

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

**Grado en Ingeniería de Materiales**

**EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL ALUMBRADO  
DE LA CIUDAD CONDAL Y PLANIFICACIÓN DE  
FUTURAS MEDIDAS DE ACCIÓN.**



**Memoria y Anexos**

**Autor:** Lucas Alavedra Alonso

**Director:** Georgina Fabregat Jové

**Convocatoria:** mayo 2018



## RESUM

En la present memòria de Treball Final de Grau (TFG) s'estudia la situació actual dels fanals d'acer patinable (o acer corten) i de ferro colat (gris i esferoidal) de l'enllumenat públic de Barcelona.

Per això, en aquest document s'analitzen les normatives vigents (UNE i UNE-EN) i es realitzen assajos electroquímics i de corrosió a un conjunt de bases i columnes d'enllumenat públic, per tal de donar suport a aquells conceptes trobats en les normatives que suposen una amenaça potencial per a la vida útil d'un fanal i que, en general, no sempre es tenen en compte (composició química i metal·logràfica, mètode de fabricació i acabat, localització del fanal i col·locació de aquest).

Finalment, s'ha creat un plec tècnic format per: de cara al fabricant, un conjunt de condicions mínimes que tot fanal ha de complir; i de cara al sol·licitant (en aquest cas el *Departament d'Enllumenat de l'Ajuntament de Barcelona*), un control de qualitat en el moment de la recepció de les mateixes.

## RESUMEN

En la presente memoria de Trabajo Final de Grado (TFG) se estudia la situación actual de las farolas de acero patinable (o acero corten) y de fundición de hierro (gris y esferoidal) del alumbrado público de Barcelona.

Para ello, en este documento se analizan las normativas vigentes (UNE y UNE-EN) y se realizan ensayos electroquímicos y de corrosión a un conjunto de bases y columnas de alumbrado público, a fin de dar respaldo a aquellos conceptos encontrados en las normativas que suponen una amenaza potencial para la vida útil de una farola y que, por lo general, no siempre se tienen en cuenta (composición química y metalográfica, método de fabricación y acabado, localización de la farola y colocación de la misma).

Finalmente, se ha creado un pliego técnico compuesto por: de cara al fabricante, un conjunto de condiciones mínimas que toda farola ha de cumplir; y de cara al solicitante (en este caso el *Departament d'Enllumenat de l'Ajuntament de Barcelona*), un control de calidad en el momento de la recepción de las mismas.





## ABSTRACT

In this Degree Final Project (DFP) report, we study the current situation of skylight steel lamps (or Corten steel) and cast iron (gray and spheroidal) of the public lighting of Barcelona.

To do so, in this document we analyze the current regulations (UNE and UNE-EN) and perform electrochemical and corrosion tests on a set of public lighting bases and columns, in order to support those concepts found in the regulations that are a potential threat to the lamp's life expectancy which, generally, are not always beard in mind (chemical and metallographic composition, method of manufacturing and finishing, location and placement of the lamp).

At last, a technical file composed by two parts has been created: as for the manufacturer, a set of conditions that every lamppost must satisfy; and as for the applicant (in this case, the *Departament d'Enllumenat de l'Ajuntament de Barcelona*), a quality control.

## GLOSARIO

1. **UNE.** Conjunto de normativas. Las UNE (Una Norma Española) son de carácter nacional creadas por AENOR.
2. **UNE-EN.** Las UNE-EN (Una Norma Española – *European Norm*) son las normas UNE que además son estándares europeos.
3. **UNE-EN ISO.** Las UNE-EN ISO (Una Norma Española – *European Norm – International Standarization Organization*) Son aquellas normas UNE-EN que además se consideran estándares internacionales.
4. **ASTM.** *American Society for Testing and Materials.* Conjunto de normativas americanas.
5. **EDX.** Espectroscopia de dispersión de energía de rayos X.
6. **MEB.** Microscopio electrónico de barrido o SEM *Scanning Electron Microscope*.
7. **ER.** Espectroscopia Raman.

# ÍNDICE

RESUM	
RESUMEN	I
ABSTRACT	II
GLOSARIO	III
1.INTRODUCCIÓN	7
2.ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO PREVIO/ ACERO CORTEN	8
2.1. Descripción de los soportes fabricados por los distintos suministradores del <i>Departament d'Enllumenat de l'Ajuntament de Barcelona</i>	8
2.2. Posibles requisitos exigidos en el pliego de condiciones técnicas para los soportes de acero autopatinables	9
2.2.1. Material base de las columnas y báculos	9
2.2.2. Dimensiones y tolerancias	9
2.2.3. Protección anticorrosión de la pátina o capa pasivante	10
2.2.4. Recubrimientos anticorrosivos adicionales	12
2.2.5. Soldadura	12
2.2.6. Pernos de anclaje	12
3.ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO PREVIO / FUNDICIÓN DE HIERRO	14
3.1. Descripción de los soportes fabricados por los distintos suministradores del <i>Departament d'Enllumenat de l'Ajuntament de Barcelona</i>	15
3.2. Posibles requisitos exigidos en el pliego de condiciones técnicas para los soportes de fundición de hierro	16
3.2.1. Material base de las columnas y báculos	16
3.2.2. Dimensiones y tolerancias	23
3.2.3. Aspecto y estado interno	24
3.2.4. Recubrimientos anticorrosivos adicionales	24
3.2.5. Soldadura	24
3.2.6. Pernos de anclaje	24
4.MÉTODOS Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	26
4.1. Descripción y codificación de los soportes suministrados para el estudio	26
4.1.1. Codificación de las probetas de acero corten	27
4.1.1. Codificación de las probetas de fundición de hierro	28

4.2.	Determinación del nivel de corrosividad ambiental de Barcelona.....	29
4.3.	Caracterización de las muestras .....	29
4.3.1.	Análisis de la composición química.....	29
4.3.2.	Análisis microestructural.....	30
4.4.	Ensayos en laboratorio .....	31
4.4.1.	Preparación de las probetas de ensayo .....	31
4.4.2.	Ensayos cíclicos acelerados de corrosión en laboratorio .....	32
4.4.3.	Ensayos electroquímicos .....	34
4.5.	Técnicas de caracterización de los productos de corrosión utilizadas durante el estudio.....	35
4.5.1.	Espectroscopía Raman (ER).....	35
4.5.2.	Microscopía óptica con luz polarizada .....	36
4.5.3.	Microscopía electrónica de barrido (MEB) .....	36
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN/ ACERO CORTEN .....</b>	<b>37</b>
5.1.	Evaluación visual del estado de corrosión de los soportes suministrados por el Ayuntamiento de Barcelona .....	37
5.1.1.	Categoría de corrosividad en servicio .....	37
5.1.2.	Grado de corrosión de los soportes .....	38
5.1.3.	Estado del recubrimiento anticorrosivo.....	40
5.1.4.	Composición química en material de base .....	41
5.1.5.	Composición química en soldadura .....	43
5.1.6.	Dimensiones y tolerancias.....	46
5.1.7.	Propiedades mecánicas.....	46
5.2.	Caracterización de los productos de corrosión formados durante su vida útil....	47
5.2.1.	Coloración y textura de las herrumbres.....	47
5.2.2.	Naturaleza y estructura de la capa de herrumbre.....	50
5.3.	Comportamiento frente a los ensayos de corrosión.....	52
5.3.1.	Ensayos cíclicos acelerados de corrosión.....	52
5.3.2.	Ensayo de inmersión constante .....	58
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN/ FUNDICIÓN DE HIERRO .....</b>	<b>61</b>
6.1.	Evaluación visual del estado de corrosión de los soportes suministrados por el Ayuntamiento de Barcelona .....	61
6.1.1.	Categoría de corrosividad en servicio .....	61
6.1.2.	Grado de corrosión de los soportes .....	61
6.1.3.	Estado del recubrimiento anticorrosivo adicional.....	62

6.2.	Caracterización de la fundición de hierro .....	62
6.2.1.	Microestructura .....	62
6.2.2.	Dimensiones y tolerancias .....	67
6.2.3.	Aspecto y defectos de fundición.....	67
6.2.4.	Propiedades mecánicas .....	69
6.3.	Caracterización de los productos de corrosión formados durante su vida útil ...	70
6.4.	Comportamiento frente a los ensayos de corrosión .....	71
6.4.1.	Ensayos cíclicos acelerados de corrosión .....	71
6.4.2.	Ensayo de inmersión constante.....	77
<b>7.</b>	<b>ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL .....</b>	<b>80</b>
	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>81</b>
	<b>COSTES DEL PROYECTO .....</b>	<b>88</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>89</b>
	<b>ANEXO A .....</b>	<b>93</b>
	<b>ANEXO B .....</b>	<b>111</b>

## 1.INTRODUCCIÓN

Barcelona posee actualmente alrededor de 146.000 puntos de luz <sup>[1]</sup> repartidos por toda la ciudad. Cada año se destinan aproximadamente 12 millones de Euros al mantenimiento, reparación y sustitución del alumbrado público <sup>[2]</sup>. Y a pesar de que la garantía de vida útil esperada para una farola es de por lo menos 20 años, su esperanza de vida media es de menos de 15 años <sup>[3]</sup>. ¿A qué se debe esta diferencia?

La materia prima, método de fabricación, localización y/o colocación son algunos de los puntos clave para determinar la esperanza de vida del alumbrado público, y muchas veces estos no se tienen en cuenta a la hora de la realización de un proyecto. Esto lleva a problemas de desgaste y corrosión que terminan con la inminente sustitución de la farola y por lo tanto con el aumento del coste de sustitución del alumbrado público.

Así pues, este trabajo se origina de la petición por parte del *Departament d'Enllumenat de l'Ajuntament de Barcelona*, para definir los requisitos de fabricación y colocación de columnas de alumbrado de fundición de hierro y de acero corten.

Puesto que el pliego de alumbrado público no presenta ninguna mención sobre estos tipos de columnas se tendrá que analizar la normativa, los materiales de fabricación y la óptima localización y colocación de las mismas.

## 2. ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO PREVIO/ Acero Corten

Los aceros con resistencia mejorada a la corrosión atmosférica se denominan también aceros patinables o aceros Corten. Este tipo de acero se caracteriza por el cambio continuo de color durante el proceso de oxidación por efecto de la luz y de las condiciones atmosféricas. La capa de óxido superficial de este acero, y causante del cambio de color, se vuelve más y más estable con el paso de los años, a diferencia de los aceros con revestimientos de colores sintéticos que, por la agresión de los agentes atmosféricos, pierden color y gradualmente se van descomponiendo.

En la fase inicial de la corrosión se forma una capa de óxido impermeable muy bien adherida en el acero corten. Esta capa consiste en óxidos de hierro enriquecidos con los elementos de la aleación con los que se fabrican, tales como cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni) y fósforo (P). Esta capa compacta de oxidación superficial, que se forma más lenta o más rápidamente, en función de la atmósfera que le envuelve, impide una difusión adicional del oxígeno en el metal base y de este modo se evita la corrosión interna.

### 2.1. Descripción de los soportes fabricados por los distintos suministradores del *Departament d'Enllumenat de l'Ajuntament de Barcelona*

Los aceros autopatinables se caracterizan por presentar una mayor resistencia a la corrosión que los aceros ordinarios y además poseen superiores propiedades mecánicas, por lo que constituyen un material idóneo para sustituir el acero al carbono en estructuras de larga duración. Sin embargo, este material sigue siendo inferior en comparación a otros materiales comúnmente utilizados, tales como el acero galvanizado y aleación de aluminio. Por este motivo, y otros factores económicos, la fabricación de columnas y/o báculos basados en acero autopatinable no es muy habitual en el sector del alumbrado público.

Entre los fabricantes habituales del *Departament d'Enllumenat*, la Industrias Jovir S.L. y Escofet 1886 S.A. incluyen el acero autopatinable en algunos de sus soportes <sup>[4]</sup> <sup>[5]</sup>, mientras que Roura S.A. lo proporciona únicamente como una pintura de acabado <sup>[6]</sup>.

La información técnica de las columnas y/o báculos indicada en los catálogos de Industrias Jovir S.L. y Escofet 1886 S.A. <sup>[4]</sup> <sup>[5]</sup>, si describe el uso de acero corten, pero sin especificar, según la UNE-EN 10027-1:2017<sup>[7]</sup> y/o 10027-2:2017<sup>[8]</sup>, la designación simbólica y/o numérica del acero empleado. Asimismo, en los soportes de Escofet 1886 S.A. y de acuerdo con lo descrito en la

Instrucción del acero estructural (EAE), aprobado en el RD 751/2011<sup>[9]</sup>, se incluye un incremento en el espesor nominal de 1mm con respecto a los soportes análogos de acero galvanizado.

La normativa UNE-EN 40-5: 2003<sup>[10]</sup> se mantiene vigente para este tipo de soportes.

## **2.2. Posibles requisitos exigidos en el pliego de condiciones técnicas para los soportes de acero autopatinables**

En este apartado se describen algunas consideraciones y/o los posibles requerimientos técnicos a tener en consideración en la fabricación de columnas y báculos basados en acero patinable, en cuanto concierne al material de base y a la protección frente a la corrosión, así como a la normativa general aplicable que deben cumplir los suministradores.

### **2.2.1. Material base de las columnas y báculos**

La calidad mínima de acero exigido en la fabricación de soportes es S235JR (UNE-EN 10025-2:2006<sup>[11]</sup>). Según la UNE-EN 10027-1:2017<sup>[7]</sup>, el acero S235JR corresponde a un Acero estructural (S) con un valor mínimo garantizado de límite elástico de 235Mpa (N/mm<sup>2</sup>) a temperatura ambiente, con un valor mínimo de energía de flexión por choque de 27 J a 0 °C (JR).

De este modo, y manteniendo las mismas características mecánicas, el tipo de acero patinable equivalente corresponde a S235JOW. Los parámetros modificados son motivados por:

- Sustitución del grado JR por JO: los grados suministrados en aceros estructurales patinables son JO, J2 y K2.
- Incorporación de W: hace referencia a la resistencia mejorada a la corrosión atmosférica.

La nomenclatura normalizada para los aceros patinables viene recogida en el **Anexo A1**.

### **2.2.2. Dimensiones y tolerancias**

Según la UNE-EN 10025-5:2004<sup>[12]</sup>, en el momento del diseño y montaje del soporte se deberían prever las necesidades que la capa de óxido autoprotectora necesitara para su formación y regeneración. El fabricante tiene la responsabilidad de tener en cuenta la corrosión de los aceros no protegidos en los cálculos y, en la medida de lo posible, compensarlos aumentando del espesor de los productos, tal y como se indica en el RD 751/2011<sup>[9]</sup>.



### 2.2.3. Protección anticorrosión de la pátina o capa pasivante

La actual normativa europea no especifica el requisito mínimo de espesor nominal y composición química que debe cumplir la capa pasivante para su aceptación. Por otra parte, el RD 751/2011<sup>[9]</sup> indica que las superficies de aceros patinables deben presentar un aspecto aceptable tras su exposición a la intemperie. Para ello puede ser necesaria su limpieza por chorreado mediante agua a presión, y así garantizar una textura similar y un color homogéneo. Hay que tener en cuenta que el mecanismo de autoprotección que se desarrolla en este tipo de aceros sólo tiene lugar con ciclos alternados secos y húmedos y siempre que no exista polución atmosférica ácida o salina <sup>[13]</sup>.

Los mecanismos de formación de la herrumbre protectora vienen explicados con detalle en el **Anexo A6**.

Asimismo, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones técnicas:

- La patinabilidad de un acero se encuentra asociado a su composición, concretamente en sus adiciones de Cr, Ni, Cu y P.
- La superior resistencia a la corrosión no se hace evidente en las etapas iniciales de corrosión, sino con el transcurso del tiempo. Por este motivo, no es de extrañar que durante la preexposición de 1 semana el acero al carbono presente mayor resistencia a la corrosión.
- Las zonas parcialmente inmersas en el pavimento constituyen una categoría de corrosividad muy elevado (> C3). Procesos de aireación diferencial se producen en la zona de interfase (aire-pavimento). En estas condiciones de corrosividad, el acero patinable no es capaz de generar una pátina estable, y en consecuencia se produce una pérdida de masa superior a la obtenida en acero ordinario.
- Otras zonas cercanas a flujos de agua constantes, tales como desagües o aspersores, pueden también llevar a una mala formación de la capa pasivante, tal y como sucede en la **Figura 2.1**.
- El desgaste normal de la superficie a la intemperie de acero autopatinable causa escorreduras de óxido en otros materiales y superficies en contacto. En la **Figura 2.2**. se pueden apreciar estas manchas.



**Figura 2.1.** Columna de acero autopatinable de Escofet 1886 S.A. embutidas parcialmente en el suelo y cerca de un punto de riego instalada en la *EEBE*



**Figura 2.2.** Columnas de acero autopatinable de Escofet 1886 S.A. embutidas parcialmente en el pavimento instaladas en la *EEBE*.

#### 2.2.4. Recubrimientos anticorrosivos adicionales

Según la UNE-EN 10025-5:2004<sup>[12]</sup>, es absolutamente indispensable la protección adicional cuando la estructura va a estar en contacto con el agua durante periodos prolongados, permanentemente expuesta a la humedad, o se va a utilizar en atmósfera salina. Los productos deben decaparse antes de pintarlos. En condiciones análogas, la susceptibilidad a la corrosión de los aceros patinables revestidos de pintura es menor que la de aceros de construcción tradicionales.

#### 2.2.5. Soldadura

Según la UNE-EN 10025-5:2004<sup>[12]</sup> y el RD 751/2011<sup>[9]</sup>, si se utiliza un material de aporte con resistencia mejorada a la corrosión atmosférica, es necesario asegurarse de que la soldadura es también resistente a la intemperie.

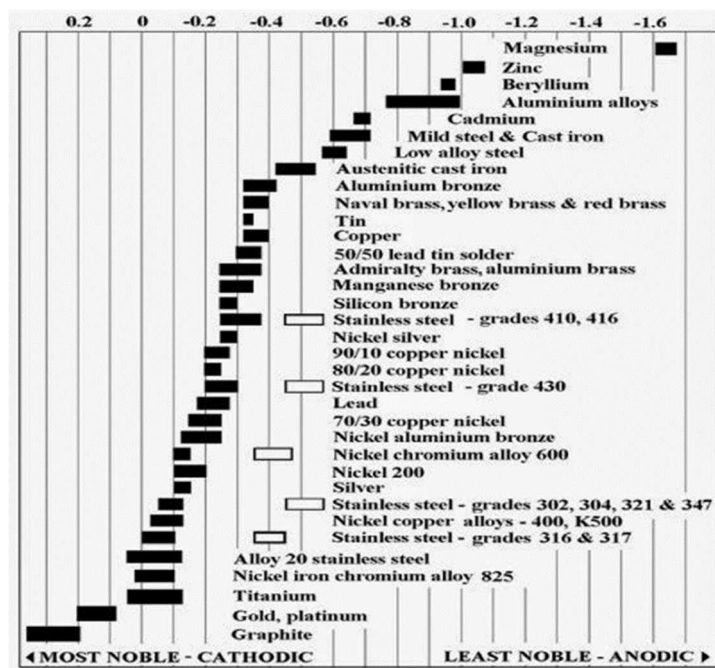
Antes de proceder al soldeo, se debería suprimir toda la capa superficial que se haya formado a una distancia comprendida entre 10 y 20 mm de los bordes de unión de las piezas.

Se deberían tomar precauciones particulares para la soldadura de los tipos de acero S335JOWP y S335J2WP con un elevado contenido de fósforo.

Las exigencias generales referentes al soldeo por arco de los aceros especificados en la norma UNE-EN 10025-5:2004<sup>[12]</sup> se especifican en la EN 1011-2:2004<sup>[14]</sup>.

#### 2.2.6. Pernos de anclaje

Según la UNE-EN 10025-5:2004<sup>[12]</sup> y el RD 751/2011<sup>[9]</sup>, en caso de montaje por remachado y atornillado es conveniente elegir con precaución el material empleado para prevenir la formación de pares galvánicos, y como consecuencia iniciar el proceso de corrosión. Los pares galvánicos se producen cuando existe continuidad eléctrica entre dos materiales de diferente potencial electroquímico. La tendencia que presentan metales y aleaciones disímiles en lo que respecta a la corrosión bimetálica depende en parte de su respectiva posición en la serie galvánica: cuanto más distantes están, mayor es su tendencia a esta forma de ataque. Tal y como se indica en la **Tabla 2.1.**, el acero patinable (*Low alloy Steel*) exhibe un potencial eléctrico muy similar al acero ordinario (*Mild Steel*), indicando la idoneidad de este último para ser usado en el anclaje. Sin embargo, el aluminio y el zinc presentan valores más negativos, lo que se traduce en una mayor tendencia a sufrir un ataque corrosivo en ellos. El acero inoxidable indica un mayor potencial eléctrico produciendo el mismo efecto corrosivo, pero en este caso el perjudicado es el acero patinado.



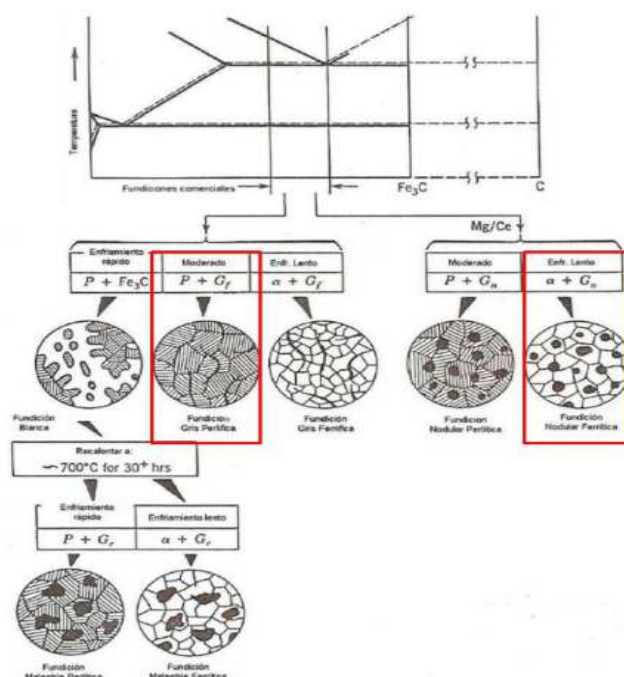
**Tabla 2.1.** Potenciales eléctricos de los materiales [15].

### 3. ANÁLISIS TÉCNICO Y NORMATIVO PREVIO / Fundición de Hierro

Las fundiciones de hierro son aleaciones de hierro (Fe) y carbono (C), donde el contenido de carbono puede variar del 2 al 5%, pudiendo presentar cantidades de otros elementos en la aleación como el silicio (Si), del 2 al 4%; el manganeso (Mn), hasta 1%; y siendo bajo el contenido de azufre (S) y de fósforo (P). Las fundiciones más empleadas son la gris y la esferoidal, indicadas en rojo en la **Figura 3.1.**, aunque estas también pueden ser fundiciones blancas, atruchadas, maleables o aleadas.

La fundición gris es la que presenta todo o gran parte de su carbono en forma de grafito laminar, mientras que la fundición esferoidal o nodular presenta el grafito en forma de esferoides.

El uso extensivo del hierro de fundición se basa principalmente en la fabricación, altamente viable, de piezas de diferente tamaño y complejidad, dado que se conforman directamente por moldeo. Estas fundiciones son resistentes al choque térmico, a la corrosión, presentan una buena resistencia al desgaste y son relativamente duras. Sin embargo, no son dúctiles, ni maleables y son poco soldables.



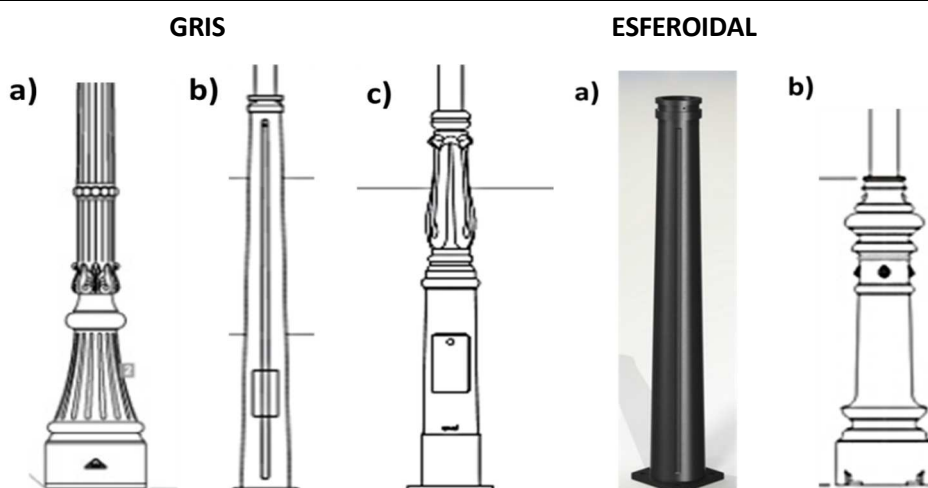
**Figura 3.1.** Tipos de fundición de hierro y su microestructura en función de la velocidad de enfriamiento de la pieza y diagrama de composición-temperatura de Fe-C.

### 3.1. Descripción de los soportes fabricados por los distintos suministradores del *Departament d'Enllumenat de l'Ajuntament de Barcelona*

En la **Tabla 3.1.** se indican las fundiciones de hierro empleadas por algunos fabricantes de soportes de alumbrado <sup>[16] [6] [17] [18] [19]</sup>. Según la UNE-EN 1560:2011<sup>[20]</sup>, las designaciones usadas son la EN-GJL-200 (UNE-EN 1561:2012<sup>[21]</sup>, fundición gris) y EN-GJS-200 (UNE-EN 1563:2012<sup>[22]</sup>, fundición esferoidal). La información referente a los soportes basados en fundición esferoidal (EN-GJS-200), se asocia incorrectamente a la UNE-EN 1561<sup>[21]</sup>, cuya normativa está vinculada a la fundición gris. Por otra parte, la designación EN-GJS-200 no se encuentra referenciada en la normativa internacional (europea y americana). Todo ello hace sospechar que se trata de un error en la descripción de soportes, pero, a pesar de ello, la fundición esferoidal será valorada como una alternativa a la fundición gris.

La nomenclatura normalizada para las fundiciones de hierro viene recogida en el **Anexo B1**.

Fabricante	Soportes y/o columnas
<b>FUNDICIÓN GRIS (ENGJL200)</b>	
<b>Salvi, S.L.</b>	a) Modelo Balmes: Base y fuste de ENGJL200.
<b>Roura, S.A.</b>	b) Modelo Masella: Base de EN-GJL-200. c) Modelo Ochocentista: Base de EN-GJL-200.  Ambos fustes son de acero estructural S235JRH
<b>FUNDICIÓN ESFEROIDAL (EN-GJS-200)</b>	
<b>La Nave Fabricados</b> (Modelo Magolla)	a) Modelo Magolla, CRA-20170 y Columnas Serie planet. b) Modelo Capital.
<b>Forjas estilo</b> (Modelo Columnas Serie planet)	Todos los modelos: Base de EN-GJS-200 según Norma UNE-EN-1561/98 (es incorrecta y no vigente).
<b>R. Ros Alguer, S. A.</b> (Modelo CRA-20170)	En todos los casos; Fuste tubo de acero estructural o de acero inoxidable AISI 316-L



**Tabla 3.1.** Descripción del fabricante, modelo del soporte y designación empleada.

### 3.2. Posibles requisitos exigidos en el pliego de condiciones técnicas para los soportes de fundición de hierro

En este apartado se describen algunas consideraciones y/o los posibles requerimientos técnicos a tener en consideración en la fabricación de columnas y báculos basados en la fundición de hierro, en cuanto concierne al material de base y a la protección frente a la corrosión, así como a la normativa general aplicable que deben cumplir los suministradores.

#### 3.2.1. Material base de las columnas y báculos

Las propiedades de las fundiciones dependen de la forma y distribución del grafito y de las fases que constituyen la estructura de la matriz, fundamentalmente ferrita y perlita. La fase de ferrita corresponde al hierro  $\alpha$ , estable a temperatura ambiente, que viene a ser el constituyente más blando y dúctil de la matriz de las fundiciones, mientras que la fase de perlita se encuentra formada por láminas alternadas de ferrita (86.5%) y cementita (13.5%), según la reacción eutectoide del diagrama hierro-carbono (Fe-C), y proporciona resistencia a las fundiciones. En la UNE-EN ISO 78001:2002<sup>[23]</sup> se establece una serie de micrografías patrón con diferentes proporciones de ferrita/perlita/grafito, como complemento de la información proporcionada por las normas UNE-EN 1561<sup>[21]</sup> (para fundición gris) y UNE-EN 1563<sup>[22]</sup> (para fundición de grafito esferoidal).

Según la información proporcionada por los fabricantes, la calidad del hierro de fundición proporcionado en la fabricación de soportes es EN-GJL-200 (fundición gris) y EN-GJS-200

(fundición esferoidal). Según la UNE-EN 1561<sup>[21]</sup> y 1563<sup>[22]</sup>, ambas designaciones presentan una resistencia a la tracción mínima de 200 MPa.

En los siguientes apartados se detallan los requisitos principales de cada tipo de fundición, gris y nodular, a nivel de propiedades mecánicas, composición química y microestructura.

### 3.2.1.1. Fundición gris

Con la finalidad de extraer la mayor información de EN-GJL-200, cuya designación se aplica en los soportes, se recurre a la normativa actual en E.U.A. y la antigua UNE aplicable en España. En la **Tabla 3.2.** se indican las equivalencias de la fundición gris <sup>[24]</sup> entre las normas de designación de ASTM A48 (USA), la UNE-EN 1560 (europea, vigente) y la UNE 36 003:1971 (España, no vigente).

El principal criterio usado para la selección del tipo de fundición gris se centra en las propiedades mecánicas que los soportes deben presentar. Las prestaciones requeridas deberán garantizar la integridad de la estructura durante su vida útil. De este modo, las designaciones de interés son EN-GJL-150, EN-GJL-200 y EN-GJL-250.

	Grados equivalentes de fundición gris						
ASTM A48	-	NO.20 NO.25	NO.30	NO.35	NO.40 NO.45	NO.50	NO.55 NO.60
UNE-EN 1560	EN-GJL-100	EN-GJL-150	EN-GJL-200	EN-GJL-250	EN-GJL-300	EN-GJL-350	-
UNE 36 003 (no vigente)	-	FG15	FG20	FG25	FG30	FG35	-

**Tabla 3.2.** Equivalencias de la fundición gris: ASTM A48 (USA), UNE-EN 1560 (europea) y UNE 36 003 (España).

El listado completo de equivalencias para las fundiciones de hierro se encuentra en el **Anexo B2.**

- **Características mecánicas:** Las características mecánicas perceptivas que definen cada tipo de fundición son las obtenidas en probetas normalizadas e indicadas en la UNE-EN 1561<sup>[21]</sup> **[Tabla 3.3.]**.



Característica mecánica	Símbolo	Unidad SI	Designación del material (UNE-EN 1561)		
			EN-GJL-150	EN-GJL-200	EN-GJL-250
Resistencia a la tracción	Rm	MPa	150 a 250	200 a 300	250 a 350
Dureza Brinell	-	HB	155 a 215	175 a 235	195 a 245
Límite elástico convencional al 0.1%	Rp0.1	MPa	98 a 165	130 a 195	165 a 228

**Tabla 3.3.** Propiedades mecánicas de la fundición gris (UNE-EN 1561<sub>[21]</sub>).

El listado de propiedades mecánicas completo para fundiciones de hierro se encuentra en el **Anexo B3**.

- **Composición química:** Según la UNE 36111:1973<sub>[25]</sub> (no vigente), únicamente se proporciona los contenidos máximos en fósforo (P) y azufre (S). En el tipo FG20 se permite un máximo en porcentaje de P y S de 0.20 y 0.18 %, respectivamente. Los grados superiores, como por ejemplo FG35, se limita el contenido en 0.15 y 0.14 % para P y S, respectivamente. Los elementos restantes se dejan al criterio del fundidor con tal de que se obtengan las características mecánicas prescritas. En la **Tabla 3.4**. se indica orientativamente los rangos porcentuales de cada elemento comúnmente empleadas por los fundidores.

	Porcentajes en masa de cada elemento y microestructura						
	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Metalografía	UNE 36 111 (no vigente)
No.20 / FG15/ EN-GJL-150	3.2-3.5	1.8-2.4	0.5-0.9	≤0.2	≤0.12	Ferrita + Perlita	-
No.30/ FG20/ EN-GJL-200	3.0-3.5	1.4-2.0	0.7-1.0	≤0.15	≤0.12	Perlita	≤10% de ferrita
No.35/ FG25/ EN-GJL-250	2.8-3.3	1.2-1.7	0.8-1.2	≤0.15	≤0.12	Perlita	≤5% de ferrita

**Tabla 3.4.** Porcentajes en masa de cada elemento (ASTM A48<sub>[26]</sub>).

- **Microestructura:** Según la UNE 36111<sub>[25]</sub>, la estructura será perlítica en todos los tipos excepto para los FG 10 y FG 15, para los que no se especifica estructura de los grafitos.

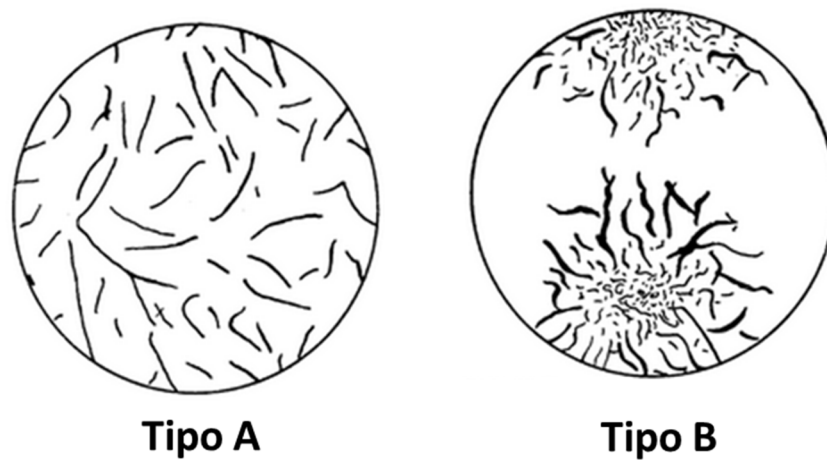
En un campo de observación de 100 aumentos, se admiten porcentajes de ferrita no superiores al 10% en los tipos FG 20 y FG 22 y menores al 5 % para los tipos FG 25, FG

26, FG 30 y FG 35, siempre que estos porcentajes no afecten al nivel de resistencia exigido.

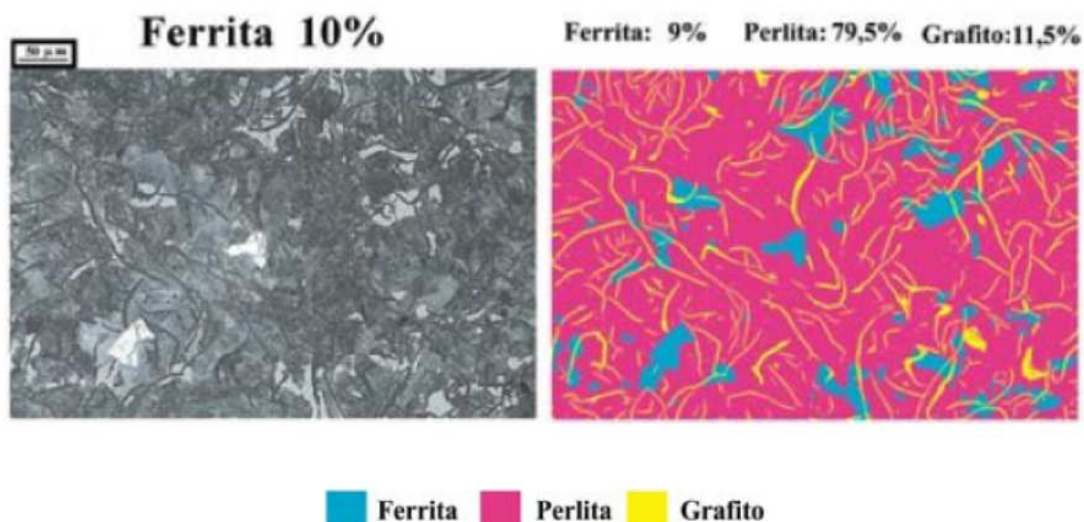
No es admisible la existencia de cementita libre apreciable a 100 aumentos en zonas que deban ir mecanizadas.

El grafito será preferiblemente de distribución tipo A, aunque se permite del tipo B (UNE-EN ISO 945-1:2012<sup>[27]</sup>), siempre que las lagunas de ferrita contenida no excedan de los porcentajes indicados anteriormente **[Figura 3.2.]**.

Por otra parte, la norma UNE-EN ISO 78001<sup>[23]</sup> establece una serie de micrografías patrón con diferentes proporciones de ferrita/perlita en la fundición gris. De este modo se facilita la estimación de la proporción de los constituyentes presentes en la estructura, completando la información que se puede obtener sobre este tipo de aleaciones. En la **Figura 3.3.** se muestra la micrografía indicada por la UNE-EN ISO 78001<sup>[23]</sup> para EN-GJL-200.



**Figura 3.2.** Distribución del grafito a 100 aumentos (UNE-EN ISO 945-1<sup>[27]</sup>).



**Figura 3.3.** Microestructura de fundición gris con un 10% de ferrita a 200 aumentos (UNE-EN ISO 78001<sub>[23]</sub>)

### 3.2.1.2. Fundición esferoidal

Las equivalencias en la designación de la fundición esferoidal <sub>[28]</sub> entre la ASTM A536 (USA), la UNE-EN 1560 (europea) y UNE 36 003 (España) se indican en la **Tabla 3.5**. Tal y como se puede observar en las distintas normativas mencionadas, la designación de EN-GJS-200 no se encuentra presente en sus descripciones. Por este motivo, las designaciones a usar como referentes serán aquellas que indican propiedades mecánicas cercanas a la designación de EN-GJS-200, siendo principalmente la EN-GJS-350.

	Grados equivalentes de fundición esferoidal				
ASTM A536	-	60-40-18	60-42-10 65-45-12	70-50-05	80-55-06 80-60-03
UNE-EN 1560	EN-GJS-350	EN-GJS-400-15 EN-GJS-400-18	EN-GJS-450-10	EN-GJS-500-7	EN-GJS-600-3
UNE 36 003 (no vigente)	-	FGE38-17	FGE42-12	FGE50-7	FGE60-2

Grados equivalentes de fundición esferoidal			
ASTM A536	100-70-03	120-90-02	—
UNE-EN 1560	EN-GJS-700-2	EN-GJS-800-2	EN-GJS-900-2
UNE 36 003 (no vigente)	FGE70-2	FGE80-2	—

**Tabla 3.5.** Equivalencias de la fundición esferoidal: *ASTM A536 (USA), EN 1563 (europea) y UNE 36 003 (España).*

El listado completo de equivalencias para las fundiciones de hierro se encuentra en el **Anexo B2**.

- **Características mecánicas:** Las propiedades mecánicas que han de obtenerse en los distintos tipos se indican en la **Tabla 3.6**. La característica de resiliencia sólo es exigible para el tipo FGE 38-17.

			Designación del material (UNE-EN 1563)	
Características Mecánicas	Símbolo	Unidad SI	EN-GJS-350	EN-GJS-400
Resistencia a la tracción mín.	N/mm <sup>2</sup> mín.	Rm	350	400
Dureza Brinell	HB	-	Menos de 160	130 a 180
Límite elástico convencional al 0.1%	N/mm <sup>2</sup> mín.	Rp0.2	220	240

**Tabla 3.6.** Propiedades mecánicas de la fundición gris (UNE-EN 1563<sub>[22]</sub>).

El listado de propiedades mecánicas completo para fundiciones de hierro se encuentra en el **Anexo B3**.

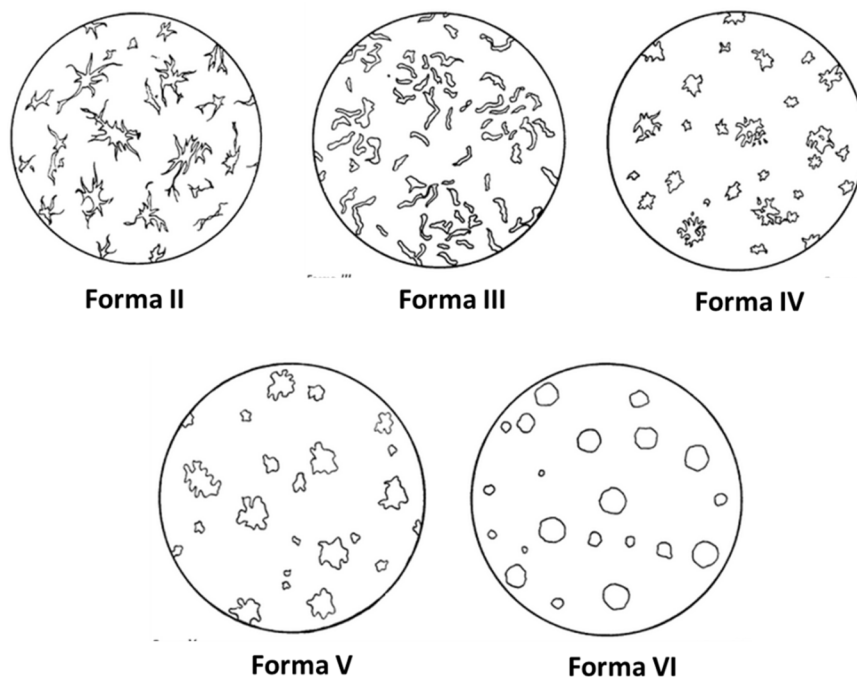
- **Composición química:** Se deja al criterio del fundidor con tal de que se obtengan las características mecánicas prescritas. En la **Tabla 3.7**, se muestra la composición química a modo orientativo para la designación EN-GJS-400 y EN-GJS-700.

Porcentajes en masa de cada elemento y microestructura							
	C %	Si %	Mn %	P % Max.	S % Max.	Metalografía	UNE 36118 (no vigente)
60-40-18/ FGE38-17/ EN-GJS-400	3.5-3.8	2.80-2.85	0.2-0.5	0.06	0.035	Ferrita	≤5% de perlita
100-70-03/ FGE70-2/ EN-GJS-700-2	3.65-3.90	1.7-1.9	0.3-0.5	0.06	0.03	Perlita	≤15% de ferrita

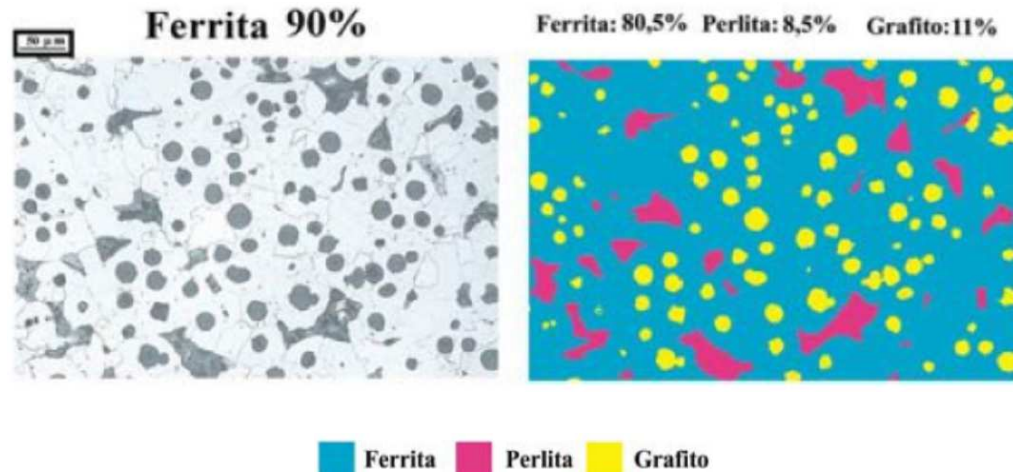
**Tabla 3.7.** Porcentajes en masa de cada elemento (ASTM A536<sub>[29]</sub>).

- **Microestructura:** Según la UNE 36118<sup>[30]</sup>, la microestructura estará de acuerdo con:
  - **Grafito:** deberá aparecer en forma esferoidal, al menos en un 85%. Tendrá la forma VI representado en la norma UNE-EN ISO 945-1<sup>[27]</sup> admitiéndose la forma V **[Figura 3.4.]**. No son admisibles las formas II a IV. Asimismo, se incluyen ciertas restricciones en la microestructura según la designación empleada.
  - **Perlita:** No se admitirán un contenido de perlita superior al 5 y 10%, respectivamente, para los tipos FGE 38-17 y 42-12. En la **Figura 3.5.** se muestra la micrografía patrón atribuible a un contenido de perlita inferior al 10% en la microestructura, según la UNE-EN ISO 78001<sup>[23]</sup>.
  - **Ferrita:** El contenido en ferrita de los tipos FGE 70-2 y 80-2 no será superior al 15%. En la **Figura 3.6.** se muestra la micrografía patrón atribuible a un contenido de ferrita inferior al 10% en la microestructura, según la UNE-EN ISO 78001<sup>[23]</sup>.
  - **Cementita:** No se admitirán en zonas que deban mecanizarse, en nervios o en zonas sometidas a esfuerzos con contenido en cementita superior al 4%.

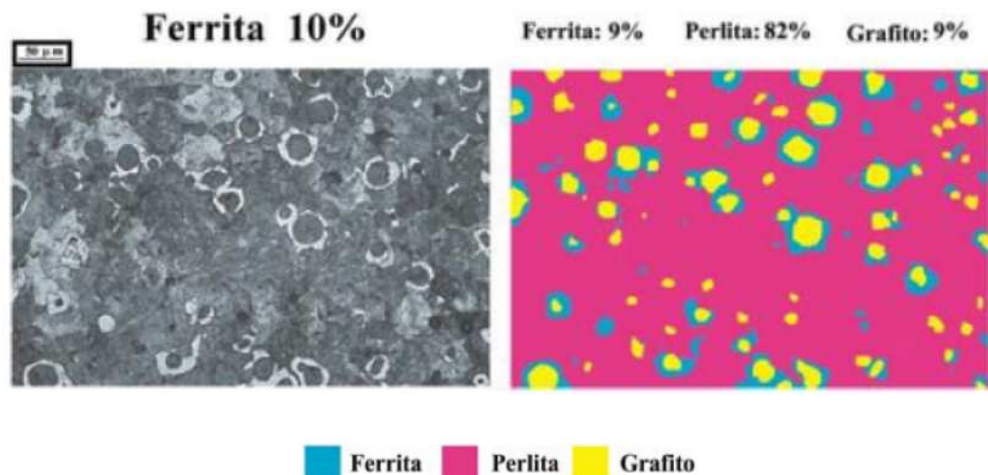
Por otro lado, la UNE-EN 1563<sup>[22]</sup> únicamente indica contenidos máximos de perlita del 5% para fundiciones ferríticas de grafito esferoidal endurecidas por solución sólida (EN-GJS-450-18, EN-GJS-500-14 y EN-GJS-600-10), y limitando la cantidad de cementita libre en 1%.



**Figura 3.4.** Distribución del grafito a 100 aumentos (UNE-EN ISO 945-1<sup>[27]</sup>).



**Figura 3.5.** Microestructura de fundición esferoidal con <10% de perlita a 200 aumentos (UNE-EN ISO 78001<sub>[23]</sub>).



**Figura 3.6.** Microestructura de fundición esferoidal con <10% de ferrita a 200 aumentos (UNE-EN ISO 78001<sub>[23]</sub>).

### 3.2.2. Dimensiones y tolerancias

Las zonas parcialmente inmersas en el pavimento constituyen una categoría de corrosividad muy elevada (> C3). Por este motivo, y a pesar de la buena resistencia a la corrosión que presenta la fundición de hierro, se considera conveniente establecer un espesor mínimo que garantice una durabilidad mínima de la columna, en especial de la zona inmersa parcialmente en el pavimento.

Según la normativa europea y el criterio mencionado se considera pues que no se superara el 10 % en la excentricidad y tolerancia máxima respecto al espesor promedio según el diseño y cálculo estructural del soporte.

### 3.2.3. Aspecto y estado interno

Las condiciones de aspecto y acabado interno para fundiciones vienen recogidas en las normas UNE-EN 1559-1:2011<sup>[31]</sup> y 1559-3:2012<sup>[32]</sup>.

Los principales defectos que hay que evitar para obtener un buen acabado están recogidos en el **Anexo B4**.

### 3.2.4. Recubrimientos anticorrosivos adicionales

En el actual pliego de condiciones, no se exige una garantía de durabilidad mínima del recubrimiento. El periodo mínimo exigido para el báculo y/o columna corresponde a la durabilidad deseada del soporte, independientemente de los componentes de protección que lo constituyan. Teniendo en cuenta el nivel de ambiente atmosférico que se espera (>C3) será necesario un recubrimiento aislante y con buena adherencia al metal a fin de evitar posibles desprendimientos.

### 3.2.5. Soldadura

La presencia de soldaduras en los soportes de fundición es relativamente baja y sin significativa repercusión en la estructura final del soporte, por este motivo no se considera un parámetro de elevado interés en el control de calidad. Sin embargo, en la UNE-EN 1011-8:2004<sup>[33]</sup> se especifica los requisitos para el soldeo por fusión de las fundiciones de hierro no aleadas y de baja aleación fabricadas, sin hacer especificación sobre la unión. La norma UNE-EN 1011-1:1998<sup>[34]</sup>, EN ISO 4063<sup>[35]</sup> y EN ISO 15609-1<sup>[36]</sup> son indispensables para la aplicación de la presente norma. El metal de aporte apropiado se debe seleccionar de acuerdo con los requisitos de la soldadura y el proceso de soldeo.

### 3.2.6. Pernos de anclaje

En caso de montaje por remachado y atornillado es conveniente elegir con precaución el material empleado para prevenir la formación de pares galvánicos, y como consecuencia iniciar el proceso de corrosión.

Tal y como se indica en la **Figura 3.7.**, el hierro colado (*Cast iron*) exhibe un potencial eléctrico muy similar al acero ordinario (*mild steel*), indicando la idoneidad de este último para ser usado en el anclaje. Los anclajes basados en zinc, aluminio y acero inoxidable quedan descartados por su diferencia en el potencial electroquímico respecto con la fundición de hierro.

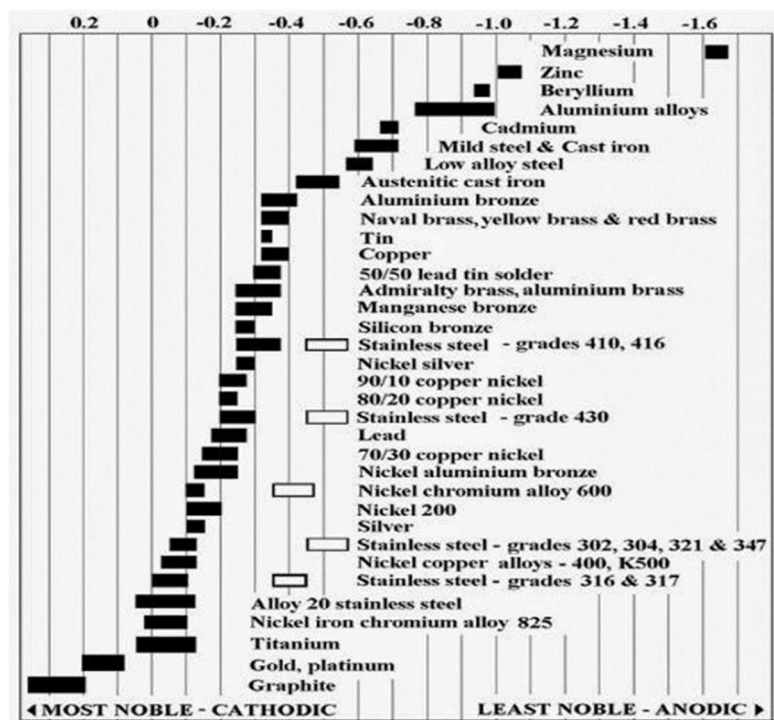


Figura 3.7. Potenciales eléctricos de los materiales [15].



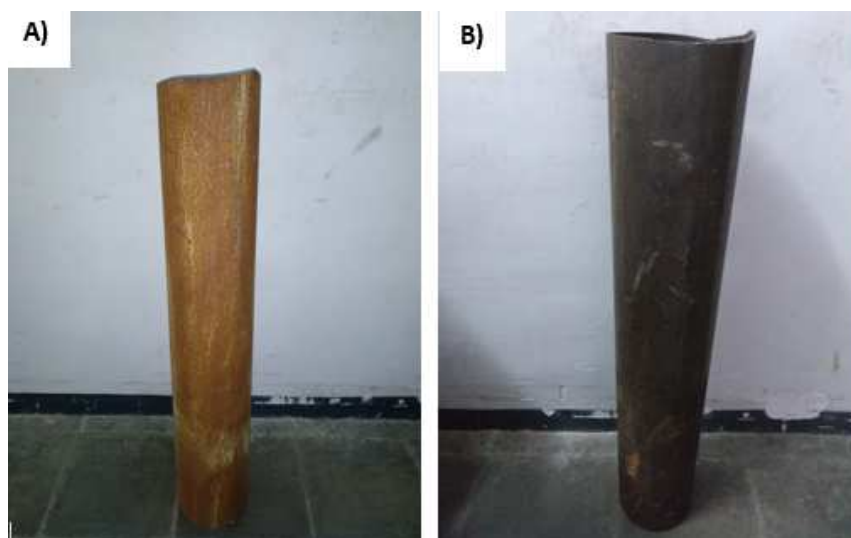
## 4.MÉTODOS Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### 4.1. Descripción y codificación de los soportes suministrados para el estudio

Los soportes suministrados por el ayuntamiento de Barcelona están compuestos por 4 bases de farola de fundición de hierro que hemos ordenado con la numeración romana I, II, III y IV [Figura 4.1.], y 2 bases de farola de acero corten que hemos designado con las letras C y F, en función de su tonalidad *Clara* y *Fosca*. [Figura 4.2.]



Figura 4.1. Bases fundición de hierro. A) I, B) II, C) III y D) IV.



**Figura 4.2.** Columnas de acero corten. A) Clara (C) y B) Fosca (F).

#### 4.1.1. Codificación de las probetas de acero corten

Se cortaron 10 probetas de cada una de las columnas C y F, se numeraron de la 1 a la 20 siguiendo la **Tabla 4.1**.

N.º	Columna	Capa protectora	Medio corrosivo	Figura
1	C	No	NaCl	<b>A7.1.</b>
2				<b>A7.1.</b>
3				<b>A7.1.</b>
4			Bisulfito Sódico	<b>A7.2.</b>
5				<b>A7.2.</b>
6				<b>A7.2.</b>
7		Si	NaCl	<b>A7.3.</b>
8			Parcialmente en H <sub>2</sub> O	<b>A7.3.</b>
9			Bisulfito Sódico	<b>A7.3.</b>
10			Repuesto	-

11	F	No	NaCl	<b>A7.4.</b>
12				<b>A7.4.</b>
13				<b>A7.4.</b>
14			Bisulfito Sódico	<b>A7.5.</b>
15				<b>A7.5.</b>
16				<b>A7.5.</b>
17		Si	NaCl	<b>A7.6.</b>
18			Parcialmente en H <sub>2</sub> O	<b>A7.6.</b>
19			Bisulfito Sódico	<b>A7.6.</b>
20			Repuesto	-

**Tabla 4.1.** Codificación de las probetas acero corten.

#### 4.1.1. Codificación de las probetas de fundición de hierro

Se extrajo una muestra de cada una de las 4 farolas de fundición de hierro, se analizó la microestructura y se determinó que las columnas I y III poseían la misma microestructura al igual que la II y la IV. Así pues, se cortaron 9 muestras de la columna IV y III. La numeración siguió la **Tabla 4.2.**

N.º	Columna	Medio corrosivo	Tiempo de ensayo (días)	Figura
A1	IV	NaCl	10	<b>B5.1.</b>
A2			20	<b>B5.1.</b>
A3			30	<b>B5.1.</b>
A4		Bisulfito Sódico	10	<b>B5.2.</b>
A5			20	<b>B5.2.</b>
A6			30	<b>B5.2.</b>

A7		NaCl	30	<b>B5.3.</b>
A8		H <sub>2</sub> O	30	<b>B5.3.</b>
A9		Bisulfito Sódico	30	<b>B5.3.</b>
B1	III	NaCl	10	<b>B5.4.</b>
B2			20	<b>B5.4.</b>
B3			30	<b>B5.4.</b>
B4		Bisulfito Sódico	10	<b>B5.5.</b>
B5			20	<b>B5.5.</b>
B6			30	<b>B5.5.</b>

**Tabla 4.2.** Codificación de las probetas fundición de hierro.

## 4.2. Determinación del nivel de corrosividad ambiental de Barcelona

Según el tipo de ambiente, la norma UNE-EN ISO 12944<sub>[37]</sub> considera 5 categorías de corrosividad para ambientes atmosféricos (C1-C5, en creciente agresividad) y 3 categorías para estructuras enterradas o semienterradas en ambientes de agua (Im1-Im2) y/o en el suelo (Im3).

En términos generales, la ciudad de Barcelona puede ser clasificada en una categoría de corrosividad C3, y en casos puntuales alcanzar un C4. Ambas categorías, se atribuyen a zonas costeras y urbanas con baja-moderada salinidad y moderada contaminación de SO<sub>2</sub> (12-14 y 40-90 µg/m<sup>3</sup>, para C3 y C4 respectivamente).

## 4.3. Caracterización de las muestras

### 4.3.1. Análisis de la composición química

El análisis de composición química de los dos tipos de farola se ha realizado mediante espectroscopia de dispersión de rayos X (EDX). Las piezas se limpiaron y pulieron previamente a fin de evitar óxidos producidos por elementos ajenos al material base, el cual, puesto que el análisis es superficial, se supuso homogéneo.

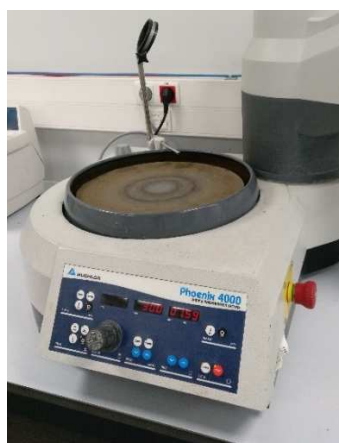
### 4.3.2. Análisis microestructural

El análisis de la microestructura se realizó únicamente en las columnas de fundición de hierro al ser estas las únicas de las que se conocían las especificaciones técnicas de microestructura. Se estudió una muestra de cara una de las bases de farola [Figura 4.3.].



**Figura 4.3.** Muestras usadas para el estudio microestructural (pre-pulido espejo). De izquierda a derecha: Probeta de base I, probeta de base II, probeta de base III y probeta de base IV

Para ello se realizó un primer rascado de la pintura, seguido de un baño con acetona a fin de reblandecer los restos de pintura. A continuación, se desbastó la superficie con la ayuda de una *Dremel* con el objetivo de facilitar el trabajo de pulido creando una superficie lo más plana posible. Después se procedió a pulir la pieza con una pulidora de plato rotatorio [Figura 4.4.] empezando por papeles de P220, P320, P400, P600, P800, P1200 hasta P2000 a fin de obtener un acabado del tipo espejo [Figura 4.5.]. Por último, se atacó con Nital al 2% durante 5 segundos a fin de revelar la microestructura de la matriz.



**Figura 4.4.** Pulido de disco circular rotatoria.



**Figura 4.5.** Muestras usadas para el estudio microestructural (post-pulido espejo). De izquierda a derecha: Probeta de base I, probeta de base II, probeta de base III y probeta de base IV.

Se tomaron imágenes con un microscopio óptico antes y después del ataque con Nital.

## 4.4. Ensayos en laboratorio

### 4.4.1. Preparación de las probetas de ensayo

Se prepararon por corte probetas de 8 x 4 cm<sup>2</sup> para el acero corten y de 4 x 4 cm<sup>2</sup> para la fundición de hierro [Figura 4.6.]. Se utilizaron medidas diferentes debido a las limitaciones mecánicas de la maquinaria de corte producidas por las diferencias en la geometría de las columnas.



**Figura 4.6.** Ejemplos de probetas. De izquierda a derecha: Acero corten de 8 x 4 cm<sup>2</sup> (Probeta 14) y fundición de hierro de 4 x 4 cm<sup>2</sup> (probeta A2).

Las probetas fueron desbastadas y pulidas por las dos caras con el objetivo de eliminar tanto las arenas de fundición aun presentes en los soportes como los óxidos generados previos al estudio, a excepción de aquellas que se habían requerido de acero corten que mantuvieran su capa de herrumbre protectora.

Se les realizo un orificio con una broca metálica de 4 mm de diámetro para su posterior sujeción en los soportes. (La probeta A3 presenta un segundo agujero que no llega a perforar la pieza por completo debido a que encontramos en esa zona un punto de soldadura demasiado fuerte para la broca).

Las muestras de fundición de hierro se pintaron por los costados y la pared exterior a fin de establecer una única cara de exposición y evitar así geometrías de difícil calculo generadas por soldaduras o cambios de grosor de las paredes de la columna, muy comunes en estos modelos de farola.

Por su parte, las muestras de acero corten se dejaron sin pintar debido a la necesidad de contacto con el ambiente de las superficies para crear así las herrumbres pasivantes. Por otra parte, la regularidad de las paredes de la columna facilito la medición de la superficie de las mismas.

Todas las probetas se numeraron con etiquetas protegidas con celo, fotografiaron con una cámara *Reflex* y pesaron en una balanza analítica de sensibilidad 0,1mg.

#### **4.4.2. Ensayos cíclicos acelerados de corrosión en laboratorio**

##### **4.4.2.1. Ensayo humectación/secado**

Las farolas se ven expuestas a diario a intervalos intermitentes de humedad seguidos de periodos de secado siendo en muchos casos estos intervalos el factor más influyente en la determinación de su vida útil. Esto no significa que la ausencia de humedad ambiental asegure una larga esperanza de vida para cualquier acero. En los aceros corten por ejemplo estos intervalos llegan a ser indispensable para la formación de su capa pasivante.

A fin de simular un ambiente acorde a los ciclos de humedad y de secado que una farola experimenta se preparó un ensayo de humectación/secado. Para ello se programó un robot **[Figura 4.7.]**, compuesto por un controlador, dos soportes, ocho lamparas y un actuador lineal que se encargaría de sumergir las probetas en los recipientes de plástico llenos de disolución siguiendo los ciclos programados en el controlador. Estos ciclos consistían en:

Fase de inmersión: 15 min.

Fase de escurrido: 30 min.

Fase de secado: 10 min.

Fase de enfriamiento: 5 min.

Tiempo total de duración del ciclo: 60 min.



**Figura 4.7.** Robot programable para ensayos de humectación/secado.

Las disoluciones usadas fueron de NaCl al 3,5% y de Bisulfito Sódico al 3,5% en masa con el objetivo de simular el grado de corrosión al que se enfrentan los soportes de farola, al ser estas las zonas donde es más probable el fallo del material.

#### **4.4.2.2. Ensayo humectación constante**

Otro factor importante que determina la vida útil de una farola es la resistencia de esta a periodos de inmersión prolongados producidos por la acumulación de líquidos en contacto con sus superficies, ya sea a causa de la forma o inclinación del terreno o incluso de un mal diseño de la farola.

Por ello se estudiará el comportamiento de las piezas sumergidas constantemente en NaCl (ambientes marítimos), Bisulfito Sódico (ambientes industriales) y en agua destilada (lluvia).

En el caso de las piezas de Acero Corten, debido a que la agresividad de los ambientes marítimo e industrial en inmersión constante impedirían por completo la formación de la capa pasivante, se estudiara únicamente el comportamiento de las probetas sin decapar sumergidas en agua destilada, siendo este el medio más común. Además, se sumergirán



únicamente de manera parcial a fin de ver la capilaridad de la herrumbre y su efecto en la zona no sumergida.

#### 4.4.2.3. Métodos de evaluación

- Determinación de la pérdida de masa y velocidad de corrosión

La velocidad de corrosión de una muestra sometida a ambientes corrosivos puede ser determinada si se conoce la pérdida de masa por unidad de área en un intervalo de tiempo controlado mediante la expresión:

$$Velocidad\ de\ corrosión = \frac{K \Delta w}{A t d} \quad (\text{Ec. 4.1.})$$

Donde K es una constante para convertir la velocidad de corrosión a las unidades deseadas (el caso de mm/año:  $K = 8,74 \times 10^{-4}$ ),  $\Delta w$  es la pérdida de masa en gramos entre los dos períodos de tiempo; A es el área de la muestra en  $\text{cm}^2$ ; t es el tiempo en horas, y d es la densidad del material en  $\text{g/cm}^3$ .

Así pues, se determinó la superficie de exposición de la probeta y su masa previos al ensayo. Cuando las muestras fueron retiradas se separó con la ayuda de una espátula aquella herrumbre que no estuviera completamente adherida a la muestra y se introdujeron durante 24 horas en un horno a  $80^\circ\text{C}$  para así poder eliminar la humedad residual. Finalmente se volvieron a pesar obteniendo así la pérdida de masa de las probetas.

- Inspección visual  
Se comparó el estado inicial y final de las muestras (coloración de las herrumbres, rugosidad y pérdida de masa aparente).
- Comportamiento electroquímico  
Se realizaron análisis Tafel de las probetas en los medios corrosivos NaCl, Bisulfito y agua destilada.

#### 4.4.3. Ensayos electroquímicos

Los ensayos electroquímicos descritos a continuación se realizaron en un potenciostato/galvanostato PGSTAT302-N como el que se muestra en la **Figura 4.8**.



**Figura 4.8.** Potenciostato usado en los ensayos electroquímicos.

#### 4.4.3.1. Curvas de polarización

Una alternativa para la determinación de la velocidad de corrosión es el uso de las curvas de polarización dinámicas. Para ello se utilizará un recipiente de plástico que se rellenará del medio corrosivo pertinente. También se pondrán en contacto con el medio un electrodo de referencia, un contra de platino y, a través de un orificio en el lateral de recipiente, la superficie del metal sobre el que se ensayara.

Una vez iniciado el programa, este recorrerá el rango de potenciales especificados y medirá la intensidad fruto de la reacción de corrosión. Una vez finalizado el espectro se aplicará el método de intersección de las curvas experimentales para así obtener la densidad de corrosión ( $i_{corr}$ ).

### 4.5. Técnicas de caracterización de los productos de corrosión utilizadas durante el estudio

#### 4.5.1. Espectroscopía Raman (ER)

A la hora de caracterizar los productos de corrosión de las probetas se ha utilizado un Espectrómetro microRaman de Renishaw a fin de averiguar la composición de los mismos.

La espectroscopía Raman es una técnica fotónica de alta resolución que consiste en la incidencia de radiación monocromática (fotones) sobre la superficie a estudiar. Estos fotones incidentes pueden tener dos comportamientos: elástico e inelástico. El comportamiento elástico sucede cuando los fotones rebotan con la misma energía de incidencia (dispersión Rayleigh), por otra parte, el comportamiento inelástico hace que los fotones al revotar cedan (Raman Stokes) o absorban (Raman anti-Stokes) parte de la energía del átomo sobre el que

inciden cambiando así su propia energía de salida [38]. Esta energía esta cuantizada mediante la expresión:

$$h(\nu_0 \pm \nu_r) \quad (\text{Ec. 4.2.})$$

Siendo h la constante de Planck,  $\nu_0$  la frecuencia de los fotones incidentes y  $\nu_r$  las diferentes frecuencias Raman de los fotones dispersados.

Una vez detectadas estas energías se pueden identificar los elementos presentes en la muestra.

#### 4.5.2. Microscopía óptica con luz polarizada

Para el análisis de la metalografía y la herrumbre superficial se utilizó un microscopio óptico de luz polarizada MBL3400.

#### 4.5.3. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Se utilizó un microscopio electrónico de barrido Zeiss Neon 40 de alta resolución equipado con análisis de dispersión de rayos X (MEB-EDX) con el objetivo de caracterizar los óxidos generados y estudiar también los puntos de soldadura presentes en los soportes de farola.

## 5.RESULTADOS Y DISCUSIÓN/ Acero Corten

### 5.1. Evaluación visual del estado de corrosión de los soportes suministrados por el Ayuntamiento de Barcelona

#### 5.1.1. Categoría de corrosividad en servicio

Con el fin de garantizar una mayor durabilidad de los soportes, y en especial los fabricados en acero autopatinable, el criterio empleado durante la ubicación y colocación debe estar acorde con los requisitos mínimos del propio material para un comportamiento apropiado. Por ello, se considera como un factor de igual o mayor relevancia que la composición química del material base para la correcta formación de una capa protectora estable y regular.

La ubicación más concreta de ambos soportes en la ciudad se sitúa aproximadamente a 1km de distancia de la costa. En concreto, el soporte C se encontraba instalado en la C/ de Pou de la Figuera, mientras que el soporte F se localizaba en la Rbl. Del Raval [Figura 5.1.].

Considerando que la salinidad atmosférica disminuye con la distancia a la costa, y a menos que la topografía local tenga características singulares, la salinidad de una atmósfera marina se reduce de forma severa tan sólo 2 Km tierra adentro. En la **Figura 5.1.** se observa como la salinidad analizada en Barcelona a 1 Km de distancia de la costa es de 11 mg Cl<sup>-</sup>/(m<sup>2</sup>d), reduciéndose a 7 mg Cl<sup>-</sup>/(m<sup>2</sup>d) cuando la distancia incrementa hasta 2 Km. Además, ambos soportes se encontraban semienterrados durante su servicio por el cual también se debe considerar una categoría de corrosividad de Im3.



**Figura 5.1.** Izq.: Ubicación de los soportes. Drcha.: Variación de la salinidad con la distancia a la costa en Barcelona.

### 5.1.2. Grado de corrosión de los soportes

Ambos soportes analizados incorporan un recubrimiento adicional desde la base hasta 1 m de altura, y conjuntamente el soporte C incluye otro recubrimiento en toda la columna. Se desconoce los años de servicio de los soportes, pero, ambos recubrimientos de la base indicaban un estado muy degradado (por ejemplo, desprendimiento del recubrimiento, ampollamiento, etc.) tal y como se muestra en la **Figuras 5.2.** y la **Figura 5.4.** Este suceso es atribuible principalmente a la escasez de ciclos alternados secos y húmedos, imprescindibles para la formación de una capa protectora densa y bien adherida.

El estado observado de la pared interna, la cual presenta elevada condensación y carece de buena ventilación, es un evidente ejemplo de dicha necesidad [**Figura 5.3.C** y **Figura 5.5.B**]. Al mismo tiempo, la pared externa de la columna también se puede ver sometida a procesos de aireación diferencial en la zona de interfase aire-pavimento, que consecuentemente aceleran el proceso de corrosión, y por otra parte una posible acumulación de partículas en su superficie provenientes del sustrato y/o de la atmósfera, impidiendo así la formación de la capa protectora.

En la **Tabla 5.1.** se describe con mayor detalle las zonas más perjudicadas por corrosión observadas en los soportes.

	PARED INTERNA	PARED EXTERNA
SOPORTE C	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pérdida parcial del material. El espesor residual es de 3mm aprox.</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Deslaminación y desprendimiento completo del acero.</li> <li>● Numerosas picaduras visibles.</li> </ul> <p>[Figuras 5.3.]</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Acumulación de partículas de tierra.</li> <li>● Deslaminación y desprendimiento completo del acero.</li> <li>● Numerosas picaduras visibles.</li> <li>● Pérdida parcial del material.</li> </ul> <p>[Figuras 5.2.]</p>
SOPORTE F	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pérdida completa del material en zona localizada.</li> </ul>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Deslaminación y desprendimiento completo del acero.</li> <li>● Numerosas picaduras visibles.</li> </ul> <p>[Figuras 5.5.]</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Corrosión muy focalizada en zona de soldadura.</li> </ul> <p>[Figuras 5.4.]</p>

**Tabla 5.1.** Descripción del estado de corrosión en la base de los soportes.

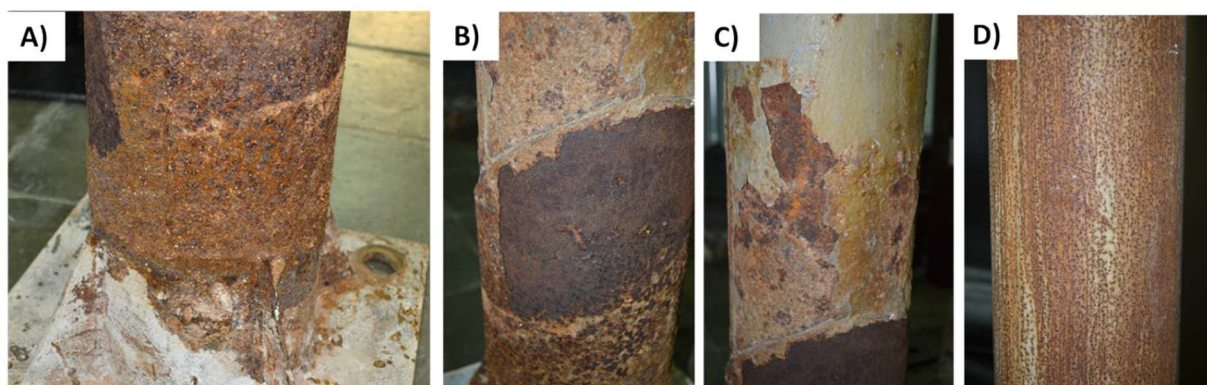


Figura 5.2. Soporte C.

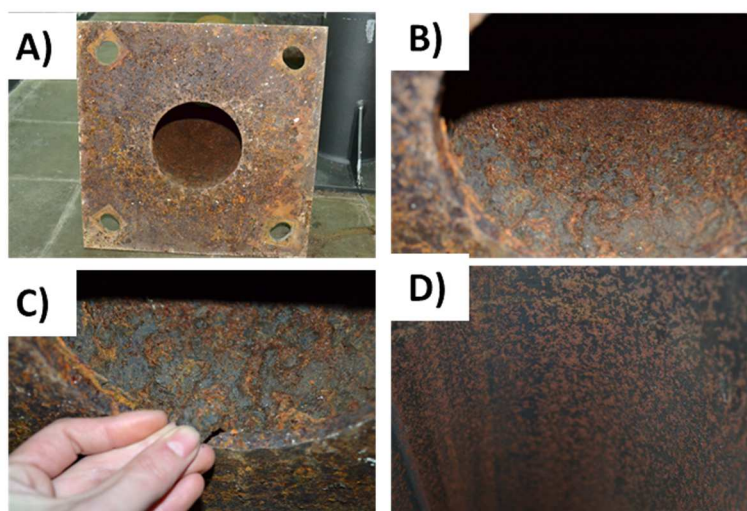


Figura 5.3. Soporte C (pared interna).

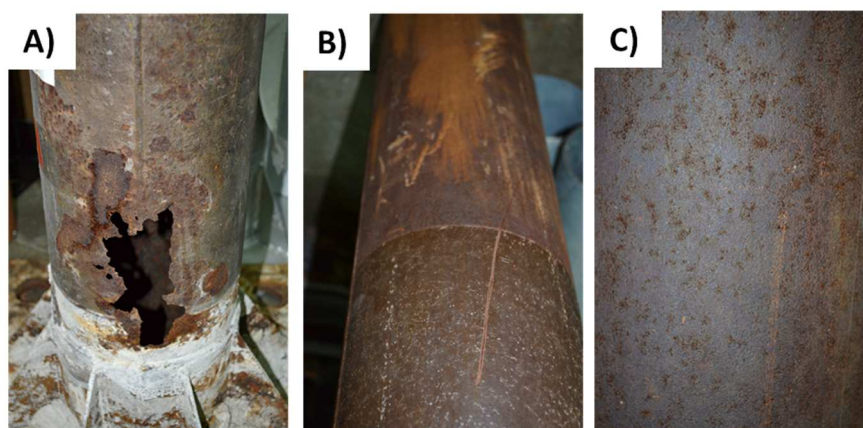


Figura 5.4. Soporte F.



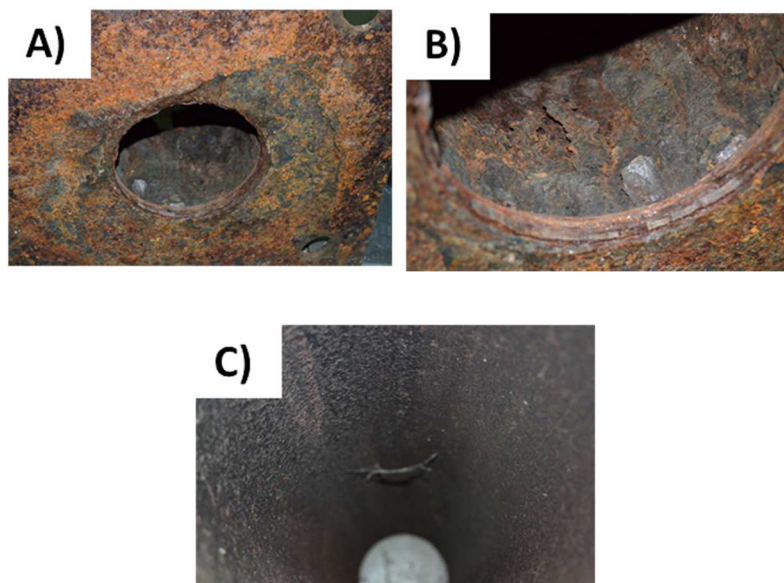


Figura 5.5. Soporte F (pared interna).

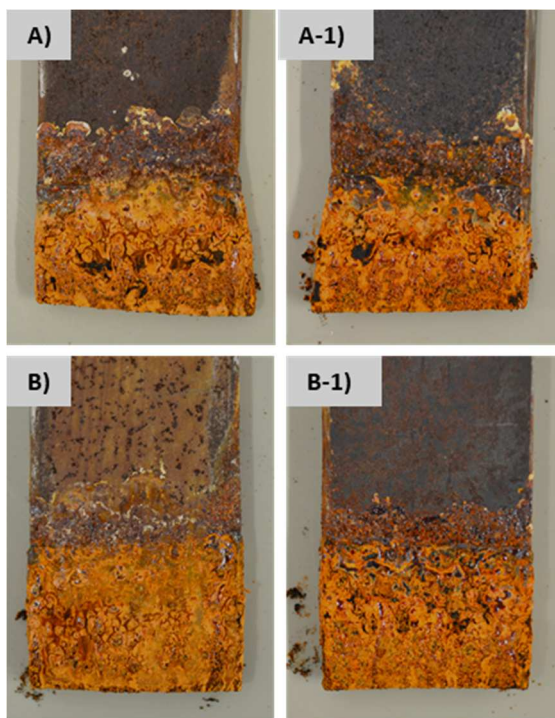
### 5.1.3. Estado del recubrimiento anticorrosivo

Los ensayos de inmersión parcial constante en agua destilada evidencian, en ambos soportes y sin diferencias significativas, los efectos negativos de la aireación diferencial y la humedad ascendente [Figura 5.6.]. Los soportes instalados por la empresa Escofet 1886, S.A. en la *Escola d'Enginyeria de Barcelona Est (EEBE)* exhiben de modos similar las consideraciones comentadas anteriormente, tal y como se puede observar en la Figura 5.7. donde la zona afectada por la humedad asciende hasta los 30 cm, aproximadamente. Estas farolas fueron colocadas hace 2-3 años y por ello el grado de corrosión es menor. Aun así, se pueden apreciar a simple vista las dificultades producidas en la formación de la capa protectora.

Por otro lado, y con el fin de determinar el grado de protección de la capa protectora presente en los soportes frente a dichos procesos de corrosión, aireación diferencial y elevada humedad, se realizaron ensayos de inmersión parcial constante en agua destilada durante 10 días. Los resultados obtenidos presentan, en ambos aceros y sin diferencias significativas, los efectos negativos comentados anteriormente [Figura 5.6.]. Con los resultados obtenidos en este ensayo, se concluye que la presencia de una capa protectora en niveles avanzados no es suficiente para garantizar su protección frente a tales fenómenos de corrosión.

Por consiguiente, se considera que la necesidad de incorporar un recubrimiento adicional en la pared interna y externa en los soportes de alumbrado, e inmersos en el pavimento, es indiscutible para un resultado satisfactorio. Las zonas protegidas deberían satisfacer como

mínimo para la pared interna una altura aproximada de 50 cm, mientras que para la pared externa se ampliaría hasta la portezuela.



**Figura 5.6.** Soportes ensayados en inmersión parcial constante en agua destilada durante 30 días.



**Figura 5.7.** Columna de acero autopatinable de Escofet 1886 S.A. inmersa en el pavimento de la EEBE.  
Caracterización de los aceros autopatinable

#### 5.1.4. Composición química en material de base

En la **Tabla 5.2.** se indica la composición química obtenida de los dos soportes suministrados mediante espectroscopia de emisión atómica. Las ligeras diferencias de composición, entre



ambos soportes, se basan principalmente en el contenido de cromo (Cr) y níquel (Ni). La muestra de Corten 1 presenta un mayor contenido de Cr que la Corten 2, mientras que con el contenido de Ni la situación se produce a la inversa.

	C % máx.	Si % máx.	Mn %	P máx. <sup>a</sup>	S % máx.	Cr %	Cu %	Otros
<b>Corten 1 (clara)</b>	0.06	0.48	0.40	0.092	0.011	0.757	0.337	Ni 0.211%
<b>Corten 2 (fosca)</b>	0.08	0.33	0.38	0.082	0.005	0.570	0.338	Ni 0.356%

<sup>a</sup> Para productos largos el contenido de P y S puede ser un 0.005% superior.

**Tabla 5.2.** Porcentajes en masa de cada elemento para los soportes suministrados.

Según la UNE-EN 10025-5:2004<sup>[12]</sup>, Corten 1 y 2 corresponden a la designación de S335J0WP debido a su alto contenido en fósforo (P) [Tabla 5.3]. La designación equivalente en la ASTM corresponde a ASTM 242. La principal característica de este tipo de acero patinables es su elevada resistencia a la corrosión atmosférica, aproximadamente 4 veces superior respecto al acero al carbono, debido a la presencia de cobre (Cu) y al fósforo (P). Sin embargo, su uso como acero estructural se encuentra algo obsoleto, ya que durante el proceso de soldadura el P es capaz de formar fosfuro de hierro (FeP<sub>3</sub>), que disminuye la soldabilidad y proporciona fragilidad al acero, cuando este se encuentra en proporciones superiores al 0,1%, pudiendo llegar a producir rotura frágil al someterse a esfuerzos vibratorios o al choque.

Designación EN 10027-1 / EN 10027-2	C % máx.	Si % máx.	Mn %	P % máx. <sup>a</sup>	S % máx.	Cr %	Cu %	Otros
<b>S235J0W / 1.8958 (S235J2W / 1.8961)</b>	0.16	0.45	0.15-0.70	0.040	0.040 (0.035)	0.35-0.85	0.20-0.60	Máx. de Ni 0.70%
<b>S335J0WP / 1.8945 S335J2WP / 1.8946 (ASTM A242)</b>	0.16	0.80	Máx. 1.10	0.05-0.16	0.040 0.035	0.25-1.35	0.20-0.60	Máx. de Ni 0.70%
<b>S355J0W / 1.8959 S355J2W / 1.8965/ (ASTM A588) S355K2W / 1.8965</b>	0.19	0.55	0.45-1.60	0.040 0.035 0.035	0.040 0.035 0.035	0.35-0.85	0.20-0.60	Máx. de Ni 0.70%

<sup>a</sup> Para productos largos el contenido de P y S puede ser un 0.005% superior.

**Tabla 5.3.** Porcentajes en masa de cada elemento (UNE-EN 10025-5:2004<sup>[12]</sup>)

La composición química detallada de los diferentes tipos de acero patinable vienen detallados en el **Anexo A3**.

Los aceros patinables S355 JO/J2/K2W, equivalentes a ASTM A588, se tratan de unos aceros con menor resistencia frente a la corrosión atmosférica debido a su inferior contenido en P, sin embargo, debido a ello muestra superior soldabilidad.

Otros estudios aseguran que la adición de 0,1% de P a un acero con una proporción de 0,5 % Cu, genera una disminución aproximada de 2,8  $\mu\text{m/año}$  en la pérdida de espesor promedio del acero (15,5 años de estudio). También se pueden encontrar estudios que afirman que la exposición a una atmósfera urbana de un acero patinable (0,1 % P, 0,26 % Cu, 0,56 % Cr, 0,16 Ni) puede presentar un espesor promedio de herrumbre de 6,8  $\mu\text{m/año}$  con unas buenas propiedades protectoras (19 años de estudio).

En consecuencia, a estas consideraciones comentadas y lo observado en los soportes, se desaconseja la utilización de S335J0WP o J2W en los soportes debido a su elevado límite máximo permitido en P, siendo una mejor opción la utilización de S235J0W o J2W con un mayor porcentaje de P [Tabla 5.4].

Designación EN 10027-1 / EN 10027-2	C % máx.	Si % máx.	Mn %	P % máx.	S % máx.	Cr %	Cu %	Otros
S235J0W / 1.8958 (S235J2W / 1.8961)	0.16	0.45	0.15- 0.70	0.1	0.015	0.35- 0.85	0.20- 0.60	Máx. de Ni 0.70%

**Tabla 5.4.** Porcentajes en masa de cada elemento en la designación S235J0W y S235J2W modificada.

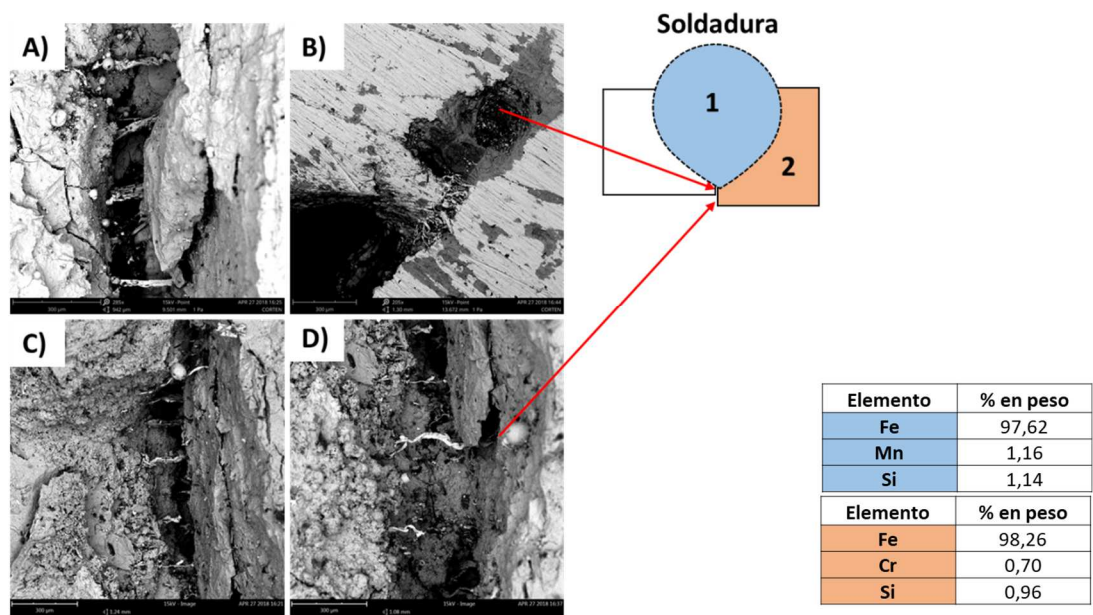
### 5.1.5. Composición química en soldadura

Las soldaduras presentes en los soportes de acero autopatinable pueden llevarse a cabo por casi todos los métodos comunes tanto manuales como automáticos, tal como sucede en los aceros no aleados. Sin embargo, la soldadura debe proporcionar una resistencia mejorada a la corrosión y presentar visualmente una buena coincidencia de color.

El material de aportación se designa según las pasadas necesarias para formar el cordón de soldadura<sup>48</sup>. Para las uniones soldadas corrientes de una sola pasada pueden usarse electrodos de acero suave (E60XX ó E70XX de la ASTM A-233), electrodos recubiertos, o las combinaciones equivalentes de alambre y alambre con fundente ya que la difusión del metal base en el de aportación produce un cordón de soldadura resistente a la corrosión y que adquiere color semejante al de dicho metal. Cuando son necesarias varias pasadas para formar el cordón, deberán usarse electrodos que contengan del 2,5% al 3,5% de níquel (E8016-C1 ó E8016-C2, norma ASTM A-316), en el caso de que la soldadura se haga manualmente con arco eléctrico; y si se trata de soldadura con arco en atmósfera de gas o arco sumergido, deberá usarse alambre de acero al níquel o combinaciones de alambre con fundente, debiendo ser el contenido de níquel del 2,5% al 3,3%.

En general, las soldaduras inspeccionadas en los distintos soportes presentan una buena coincidencia visual con el material de base y un buen acabado. Sin embargo, el soporte de Corten F presenta un grado de corrosión muy significativo en la interfase pavimento-aire y localizado en la soldadura, por ello se procede al análisis del material de unión. La composición química del material de unión obtenida mediante EDX se indica en la tabla de la **Figura 5.8**.

Tal y como se puede observar el material empleado corresponde a un acero suave con un alto contenido en Manganeseo (Mn), mientras que el elemento destacado en la zona de no soldadura es el Cromo (Cr). Por otra parte, la unión longitudinal de la columna no se ha realizado adecuadamente ya que presenta una desalineación entre las zonas de unión [**Figura 5.8.**]. Como consecuencia de esta desnivelación, se ha producido una penetración incompleta del material de unión, aproximadamente 1mm, dejando así un área susceptible de ser corroída. Análisis puntuales mediante EDX han indicado la presencia de elementos corrosivos como el Cloro (Cl) y Sulfuro (S) en el interior de la ranura.



**Figura 5.8.** Imágenes de SEM y análisis de EDX de la zona de soldadura del soporte F.

Por su parte, las farolas localizadas en la *Escola d'Enginyeria de Barcelona Est (EEBE)* presentan en su línea de soldadura picaduras tal y como se aprecia en la **Figura 5.9**.



**Figura 5.9.** Zona de soldadura en columna de acero autopatinable instalada en la *EEBE*.

### 5.1.6. Dimensiones y tolerancias

Según la UNE-EN 10025-5:2004<sup>[12]</sup> y RD 751/2011<sup>[9]</sup>, el fabricante tiene la responsabilidad de tener en cuenta la corrosión de los aceros no protegidos en los cálculos y, en la medida de lo posible, compensarlos aumentando el espesor de los productos. En concreto, según el RD 751/2011<sup>[9]</sup>, el incremento de espesor nominal en los cálculos obtenidos durante su diseño debe de ser 1mm.

El espesor de acero patinable presente en ambos soportes se muestra en la **Tabla 5.5**.

Soporte	Espesor en columna (mm)	Espesor en zona de refuerzo (mm)
Corten 1	5,10	Desconocido. Pérdida parcial de 3 mm aprox.
Corten 2	4,15	No presenta refuerzo. Pérdida completa.

**Tabla 5.5.** Espesor de pared de columna y zona de refuerzo.

### 5.1.7. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de los soportes no han sido evaluadas en este estudio ya que los aceros patinables ya poseen mejores propiedades mecánicas que los aceros al carbono comúnmente empleado en el alumbrado público. Los requisitos mecánicos exigidos para los soportes durante su servicio no son de elevada relevancia, pero sin embargo deben ser considerados. En la **Tabla 5.6**, se indica los rangos estimados por la UNE-EN 10025-5:2004<sup>[12]</sup> para las designaciones de interés anteriormente comentadas.

Designación EN 10027-1 / EN 10027-2	Mínimo límite elástico $R_{eH}$ (MPa)	Resistencia a la tracción $R_m$ (MPa)	Porcentaje mínimo de alargamiento en la rotura (%)	
EN 10027-1 / EN 10027-2	Espesor nominal (mm); <16	Espesor nominal (mm); <3 y ≥3 - ≤100	Lo = 80mm Espesor nominal (mm) >2.5 - <3	Lo = $5.65\sqrt{S_0}$ Espesor nominal (mm) >3 - ≤40
S235J0W / 1.8958 S235J2W / 1.8961	235	360 a 510 / 360 a 510	21 19	26 24
S335J0WP / 1.8945 S335J2WP / 1.8946	355	510 a 680 / 470 a 630	16 14	22 20

**Tabla 5.6.** Propiedades mecánicas de los aceros patinables según la UNE-EN 10025-5:2004<sup>[12]</sup>.

Las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de acero corten se pueden encontrar en el **Anexo A4**.

## **5.2. Caracterización de los productos de corrosión formados durante su vida útil**

Las características presentadas a nivel macroscópico y microscópico de la capa protectora durante el servicio dependen principalmente de: 1) Composición química del acero autopatinable, 2) condiciones ambientales de exposición y 3) tiempo de exposición.

### **5.2.1. Coloración y textura de las herrumbres**

En función del ambiente de exposición, e independientemente de la composición química del material de base, se atribuye pátinas con texturas más lisas, aspecto más homogéneo y granulometría más fina en las atmósferas rurales, urbanas e industriales moderadas, mientras que las texturas más rugosas, con aspecto más heterogéneo y granulometría más grosera se encuentran en las atmósferas marinas. Además, dentro de las atmósferas marinas, la herrumbre es más oscura a medida que aumenta la salinidad. Por otro lado, un mayor grado de compactación de la pátina se establece para las texturas lisas y homogéneas.

Como se ha indicado con anterioridad, la exposición atmosférica a nivel macroclimático y la composición química es muy similar o igual en ambos soportes, por consiguiente, las diferencias observadas serán atribuidas al tiempo y a las condiciones microclimáticas de exposición durante su servicio.

La textura y coloración de la herrumbre presente en ambas caras de los soportes se aprecia con claridad en la **Figura 5.10**. Tal y como se puede observar, la presencia de pátina en la pared externa del soporte C es parcial debido a la existencia del recubrimiento adicional. La herrumbre de la pared interna y externa del soporte F se muestra especialmente oscura (marrón-anaranjado y/o negro), presentando además un bajo grado de heterogeneidad. Por otra parte, a medida que nos alejamos de la base de ambos soportes, la herrumbre de la pared interna muestra una textura más heterogénea y una granulometría más grosera.

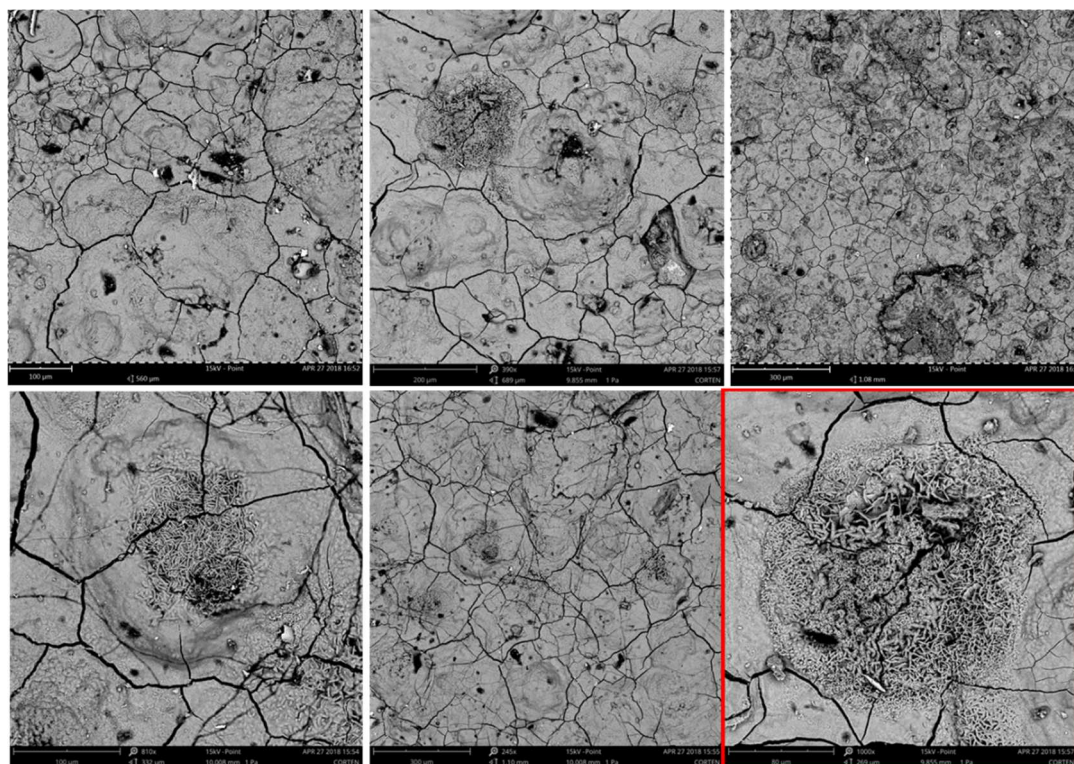


**Figura 5.10.** Textura de las pátinas formadas sobre los corten C y F en la pared interna y externa de la columna.

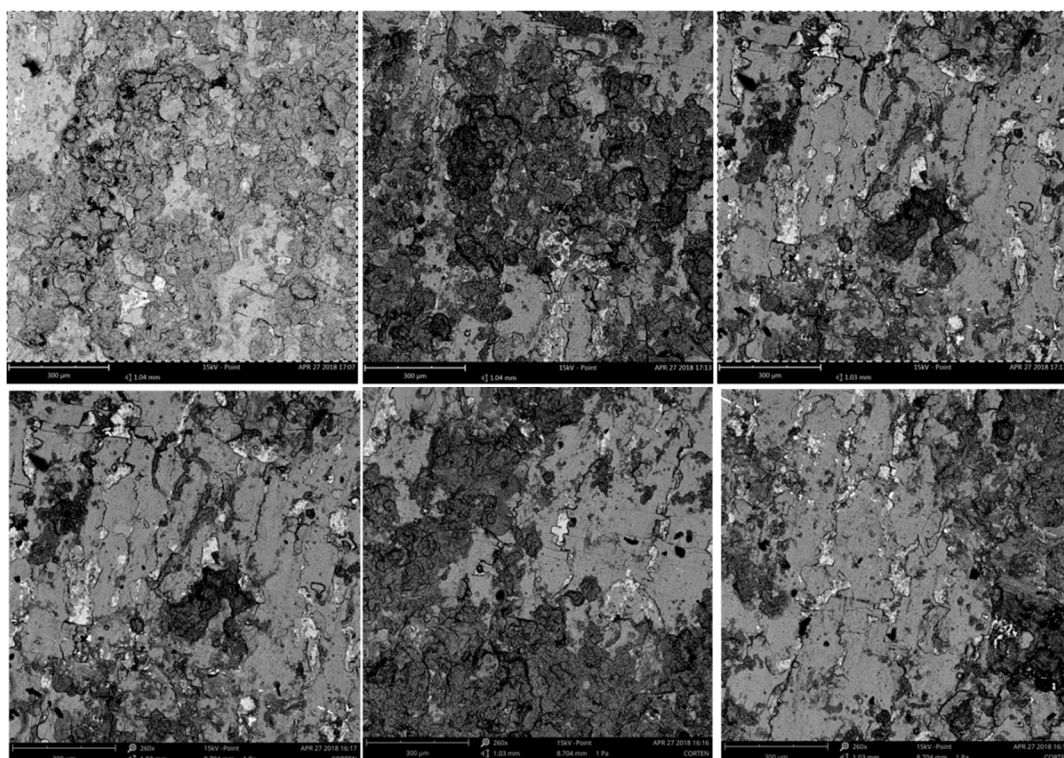
En la **Figura 5.11.** y **Figura 5.12.** se indica la morfología superficial de la capa protectora de ambos soportes obtenida por microscopía electrónica de barrido (MEB) empleando el detector de electrones retrodispersados. Como se puede observar en la **Figura 5.11.** la pared interna del soporte F presenta una capa compacta de un grosor considerable, aproximadamente de 70-80  $\mu\text{m}$ , mientras que la capa de la pared externa presenta un menor grosor alrededor de los 50  $\mu\text{m}$ . Por otro lado, el soporte C no presenta la formación de la capa, ya que como se puede observar en la **Figura 5.12.** aún se puede visualizar el acero autopatinable con óxidos en su superficie.

Así pues, se puede concluir que las condiciones más adecuadas para la formación de la pátina se dan en la parte superior de la pared externa del soporte.





**Figura 5.11.** Imágenes de SEM de la capa protectora de la pared interna del soporte F.



**Figura 5.12.** Imágenes de SEM de la capa protectora de la pared interna del soporte C.



### 5.2.2. Naturaleza y estructura de la capa de herrumbre

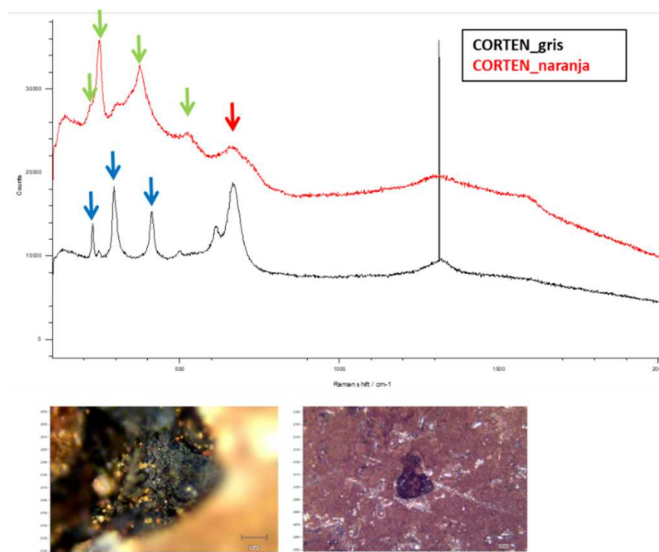
La naturaleza de las herrumbres ha sido analizada mediante espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS) y espectroscopía microRaman. El análisis se ha llevado a cabo realizando análisis puntuales en zona de interés mediante las técnicas comentadas.

Las **Figuras 5.13., 5.14. y 5.15.** muestran los espectros Raman de las herrumbres formadas en la pared interna y externa de los soportes C y F.

En la **Tabla 5.7.** se indica los principales picos encontrados y asociados a los distintos óxidos y oxihidróxidos. La herrumbre que se ha formado sobre ambos soportes está estructurada principalmente en dos capas, una externa de color marrón-anaranjado, que corresponde prácticamente en su totalidad a la fase lepidocrocita, y otra interna de color gris oscuro donde destaca la presencia de goetita y maghemita. Así mismo, los análisis EDX en el soporte F han permitido detectar contenidos de Fósforo (P) asociados a la formación de las pátinas protectoras en aceros patinables con alto contenido en P, mientras que el soporte C exhibe los contenidos asociados principalmente con el acero patinable, como por ejemplo el Cromo (Cr) y Níquel (Ni). En ambos soportes, y en especial el soporte F, se ha podido confirmar la presencia de elementos asociados a los ambientes corrosivos, como por ejemplo Cl y S.

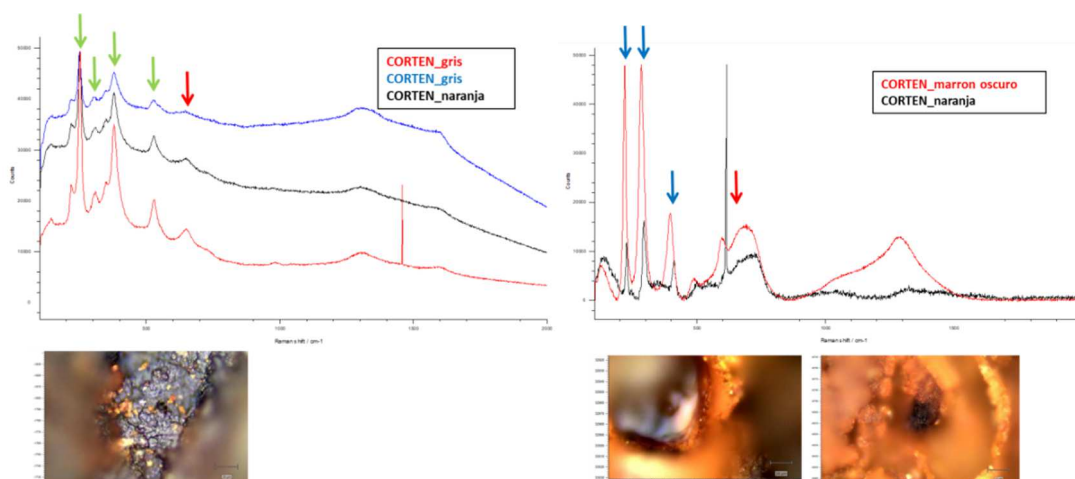
Óxido	Formula	Número de onda (cm <sup>-1</sup> )
Lepidocrocita	$\gamma$ -FeOOH	255, 350, 530
Goetita	$\alpha$ -FeOOH	248, 300, 420
Maghemita	$\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	678, 720

**Tabla 5.7.** Bandas características de los óxidos y oxihidróxidos de hierro presentes en la capa protectora de ambos soportes.

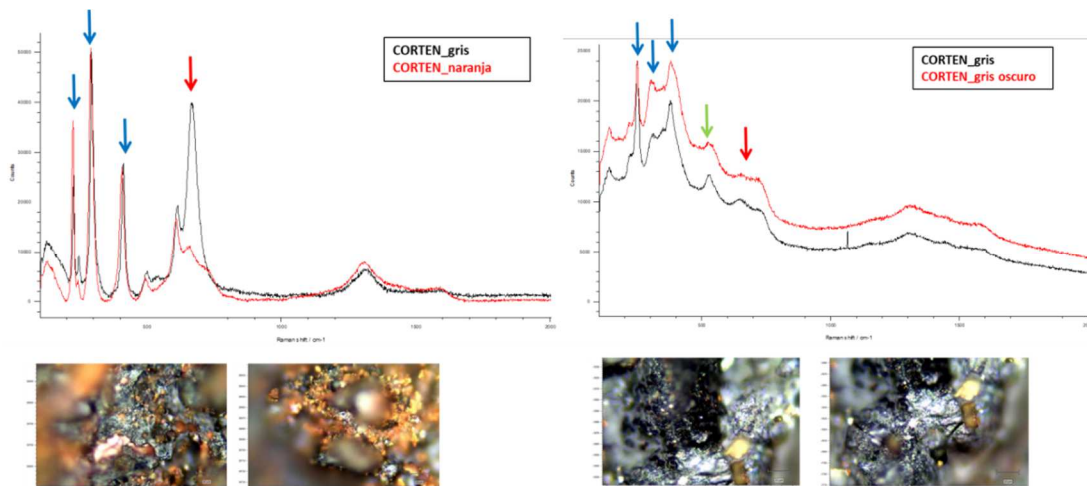


**Figura 5.13.** Espectros de Raman de la herrumbre formada en la pared externa del soporte C.

La composición y descripción de las diferentes herrumbres de los aceros corten vienen explicadas con más detalle en el **Anexo A5**.



**Figura 5.14.** Espectros de Raman de la herrumbre formada en la pared externa del soporte F. Izq: Superficie sin rasgado. Dcha: Superficie con rasgado.



**Figura 5.15.** Espectros de Raman de la herrumbre formada en la pared interna del soporte C y F. Izq.: soporte C. Dcha.: soporte F.

### 5.3. Comportamiento frente a los ensayos de corrosión

#### 5.3.1. Ensayos cíclicos acelerados de corrosión

##### 5.3.1.1. Inspección visual de las capas de herrumbre formadas

En la **Figura 5.16.** y en la **Figura 5.17.** se encuentran todas las probetas extraídas durante el ensayo cíclico después de un periodo de 10 días (equivalente a 240 ciclos).





**Figura 5.16.** Probetas de la comuna C. De izquierda a derecha y de arriba abajo: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 9.





**Figura 5.17.** Probetas de la comuna F. De izquierda a derecha y de arriba abajo: 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 19.

Las probetas 1, 2, 3, 7, 11, 12, 13 y 17 muestran una coloración naranja muy viva, además de una serie de relieves más oscuros distribuidos por gran parte de la superficie. Estos relieves son de carácter frágil, no poseen una gran adherencia a la superficie metálica y se desprenden creando pequeñas y finas laminas tal y como se puede apreciar en la parte inferior de la probeta 1. Al retirar esa superficie no adherida se observa un color marrón-anaranjado más oscuro que el de la herrumbre superficial. La superficie presenta altas rugosidades propias de una corrosión agresiva. La coloración que presenta es propia de la magnetita y de la maghemita, óxidos comunes en ambientes marítimos.

Las probetas 4, 5, 6, 14, 15, 16 y 19 presentan una coloración marrón oscura. Las probetas 5, 14 y 15 a su vez presentan una coloración blanca en la zona superior fruto de depósitos de bisulfito sódico. La probeta 9 por su parte parece haber



mantenido parte del blanco propio de la capa protectora original. La herrumbre formada por todas las probetas (incluida la 9) es de carácter arenoso muy fino. Una vez limpiadas estas probetas adoptan una tonalidad marrón un poco más clara. Esta coloración es propia de la goetita, óxido que se encuentra principalmente en la capa interna de la herrumbre protectora.

La inspección visual nos indica que en ambos casos la superficie de herrumbre creada posee una muy baja adherencia, siendo más apreciable en las probetas sumergidas en el NaCl. Visualmente no ha habido diferencias entre las probetas de la columna C y F más allá de la probeta número 9.

#### 5.3.1.2. Determinación de la pérdida de masa y velocidad de corrosión

Para la confección de las siguientes tablas se desestimaron aquellos valores que se separaban de en exceso de la media.

Las pérdidas de masa de las probetas son las siguientes **[Tabla 5.8.]**:

Nº	peso inicial (g)	peso final (g)	Diferencia (g)
1	118,932	116,483	2,449
2	125,438	123,121	2,317
4	125,892	123,891	2,001
6	111,798	110,275	1,523
7	117,661	116,328	1,333
9	124,176	122,669	1,507
11	85,469	84,427	1,042
12	92,404	90,397	2,007
14	85,962	82,102	3,860
19	84,163	82,907	1,256

**Tabla 5.8.** Pérdida de masas de las probetas de fundición.

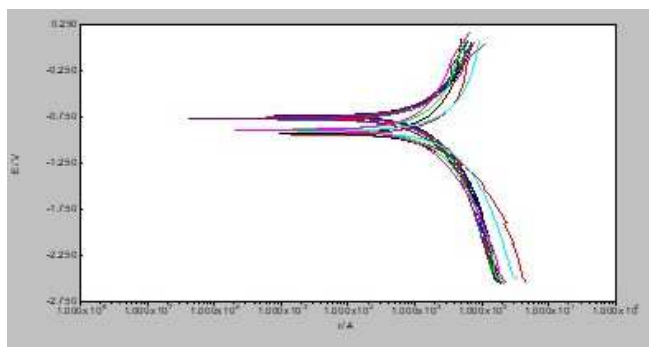
Con ellas, utilizando la **Ec. 4.1.** obtenemos las velocidades de corrosión [**Tabla 5.9.**]:

Nº	velocidad de corrosión (mm/año)
1	0,06336
2	0,05418
4	0,04568
6	0,03985
7	0,03376
9	0,03596
11	0,02976
12	0,0486
14	0,0952
19	0,0334

**Tabla 5.9.** Velocidad de corrosión (mm/año).

No se aprecia en los resultados una diferencia de velocidad de corrosión significativa entre las probetas de la columna C y de la F, podemos ver además como la velocidad de corrosión se encuentra entre el 0.09 y el 0.02 mm/año, datos significativamente altos propios de ambientes muy corrosivos.

El estudio de las velocidades de corrosión obtenido mediante Tafel [**Figura 5.18**] se presenta en la **Tabla 5.10.**:



**Figura 5.18.** Resultados del Tafel.

Nº	velocidad de corrosión (mm/año)	Figura
1	10,38	A8.1.
2	9,415	A8.2.
4	5,208	A8.3.
5	6,004	A8.4.
6	3,499	A8.5.
7	4,510	A8.6.
9	6,713	A8.7.
11	4,030	A8.8.
12	8,280	A8.9.
14	3,589	A8.10.
15	5.483	A8.11.
16	6,090	A8.12.
17	12,140	A8.13.
19	5,042	A8.14.

**Tabla 5.10.** Velocidades de corrosión obtenidas mediante Tafel.



Los resultados obtenidos para las probetas mediante el ensayo Tafel parecen ser varios ordenes de magnitud más grandes que las obtenidas mediante la diferencia de masa. Esto es debido a que el cálculo a partir de la intersección de las tangentes a las curvas de polarización no contempla los ciclos humectación/secado, si no que da un valor para una interacción continuada con el medio corrosivo.

Los valores obtenidos no parecen presentar una diferencia entre las probetas de la columna C y las probetas de la columna F.

### 5.3.2. Ensayo de inmersión constante

#### 5.3.2.1. Inspección visual de las capas de herrumbre formadas

En la figura presentada a continuación aparecen las probetas 8 y 18, sumergidas parcialmente en agua destilada durante 10 días [Figura 5.18.], 20 días [Figura 5.19.] y 30 días [Figura 5.20.].

La herrumbre formada en la **Figura 5.18.**, tomada a los 10 días, tiene un tono naranja-marronoso fuerte similar al de las probetas sumergidas en NaCl. A pesar de ello el ataque parece haber sido menos severo a pesar de presentar irregularidades superficiales en la zona sumergida.



**Figura 5.18.** Probetas 18 y 8 después de 10 días.

En la **Figura 5.19.**, tomada a los 20 días, empieza a mostrar signos de avance de la zona afectada por la corrosión. En cuanto a la coloración, aunque se ha desprendido cierta herrumbre de la zona inferior de las probetas, prácticamente se mantiene la misma que 10 días antes.



**Figura 5.19.** Probetas 18 y 8 después de 20 días.

Por último, en la **Figura 5.20.**, tomada a los 30 días, podemos ver como la zona de afectación ha aumentado un 50% su tamaño.



**Figura 5.20.** Probetas 18 y 8 después de 30 días.

Es evidente que, a pesar de la zona de corrosión adicional ha sufrido menos que la zona directamente sumergida, el avance de la misma es algo a tener en cuenta cuando nos

encontramos con columnas que, por su diseño o colocación, acumulan agua de lluvia en contacto con su superficie de acero corten.

No se han encontrado diferencias en el comportamiento de las columnas C y F para este ensayo

## 6.RESULTADOS Y DISCUSIÓN/ Fundición de Hierro

### 6.1. Evaluación visual del estado de corrosión de los soportes suministrados por el Ayuntamiento de Barcelona

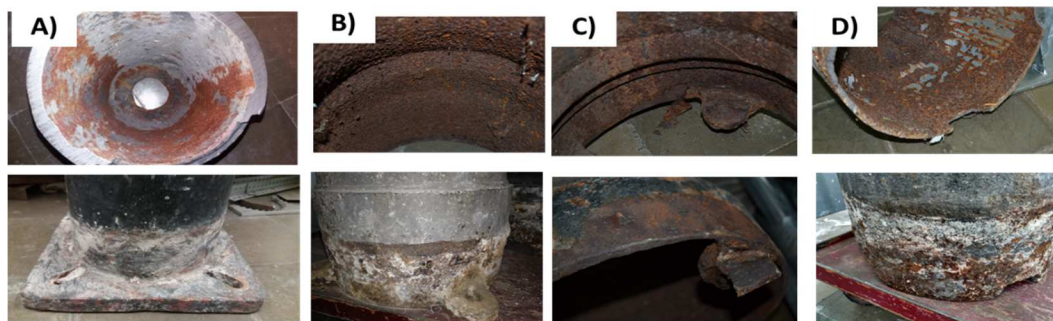
#### 6.1.1. Categoría de corrosividad en servicio

Se desconoce la ubicación exacta de ambos soportes en la ciudad por motivos técnicos, sin embargo, se conoce que el periodo de servicio ha sido superior a 25 años. Por otro lado, tal y como se ha descrito en el apartado 5.1.1. de este mismo documento, se considerará el gradiente de salinidad atmosférica con respecto a la costa presente en la ciudad de Barcelona, cuya salinidad disminuye significativamente a iguales o superiores a 1 Km ( $11 \text{ mg Cl}^-/(\text{m}^2\text{d})$ ). Asimismo, ambos soportes se encontraban semienterrados durante su servicio por el cual también se debe considerar una categoría de corrosividad de Im3.

#### 6.1.2. Grado de corrosión de los soportes

El mayor grado de corrosión en los soportes se observa en la interfase aire-pavimento y proximidades. Este suceso es atribuible principalmente a los procesos de corrosión por aireación diferencial producidos por los diferentes grados de humedad y de permeabilidad de los suelos y ambiente involucrados en la embutición.

El estado de la pared interna en la zona semienterrada y/o próxima al suelo muestra los efectos negativos producidos por la exposición prolongada a condiciones de elevada humedad y baja ventilación [Figura 6.1.]. Por otra parte, la pared externa en la zona semienterrada indica del mismo modo las consecuencias de los procesos de aireación diferencial.



**Figura 6.1.** Pared interna y externa de la base de los soportes. A) Fundición IV, B) Fundición III, C) Fundición II y D) Fundición I.

### 6.1.3. Estado del recubrimiento anticorrosivo adicional

Todos los soportes suministrados presentan un recubrimiento adicional en toda la columna. El aspecto de los recubrimientos en la base indica un estado muy degradado, por ejemplo, desprendimiento y ampollamiento, no obstante, el recubrimiento en la zona no enterrada muestra un mejor estado de conservación.

#### 6.1.3.1. Motivación del recubrimiento anticorrosivo

A pesar de la buena resistencia a la corrosión ofrecida por los hierros de fundición, la incorporación de un recubrimiento protector en la pared externa se considera oportuna para poder garantizar una mayor durabilidad del soporte frente a procesos de corrosión por aireación diferencial y otros.

Por otro lado, y con el fin de determinar la pérdida de masa frente a dichos procesos de corrosión, aireación diferencial y elevada humedad, se realizaron ensayos acelerados de corrosión mediante inmersión constante y alternada en distintos medios corrosivos durante 30 días. Los resultados obtenidos y detallados en el apartado 6.4. presentan pérdidas superiores a 0,01 mm.

## 6.2. Caracterización de la fundición de hierro

### 6.2.1. Microestructura

Como se detalló en el apartado 3, las propiedades de las fundiciones dependen de la forma y distribución del grafito y de las fases que constituyen la estructura de la matriz, fundamentalmente ferrita y perlita. La fase de ferrita corresponde al hierro  $\alpha$ , que viene a ser el constituyente más blando y dúctil de la matriz de las fundiciones, mientras que la fase de perlita se encuentra formada por láminas alternadas de ferrita (86.5%) y cementita (13.5%), según la reacción eutectoide del diagrama hierro-carbono (Fe-C) y que proporciona resistencia a las fundiciones.

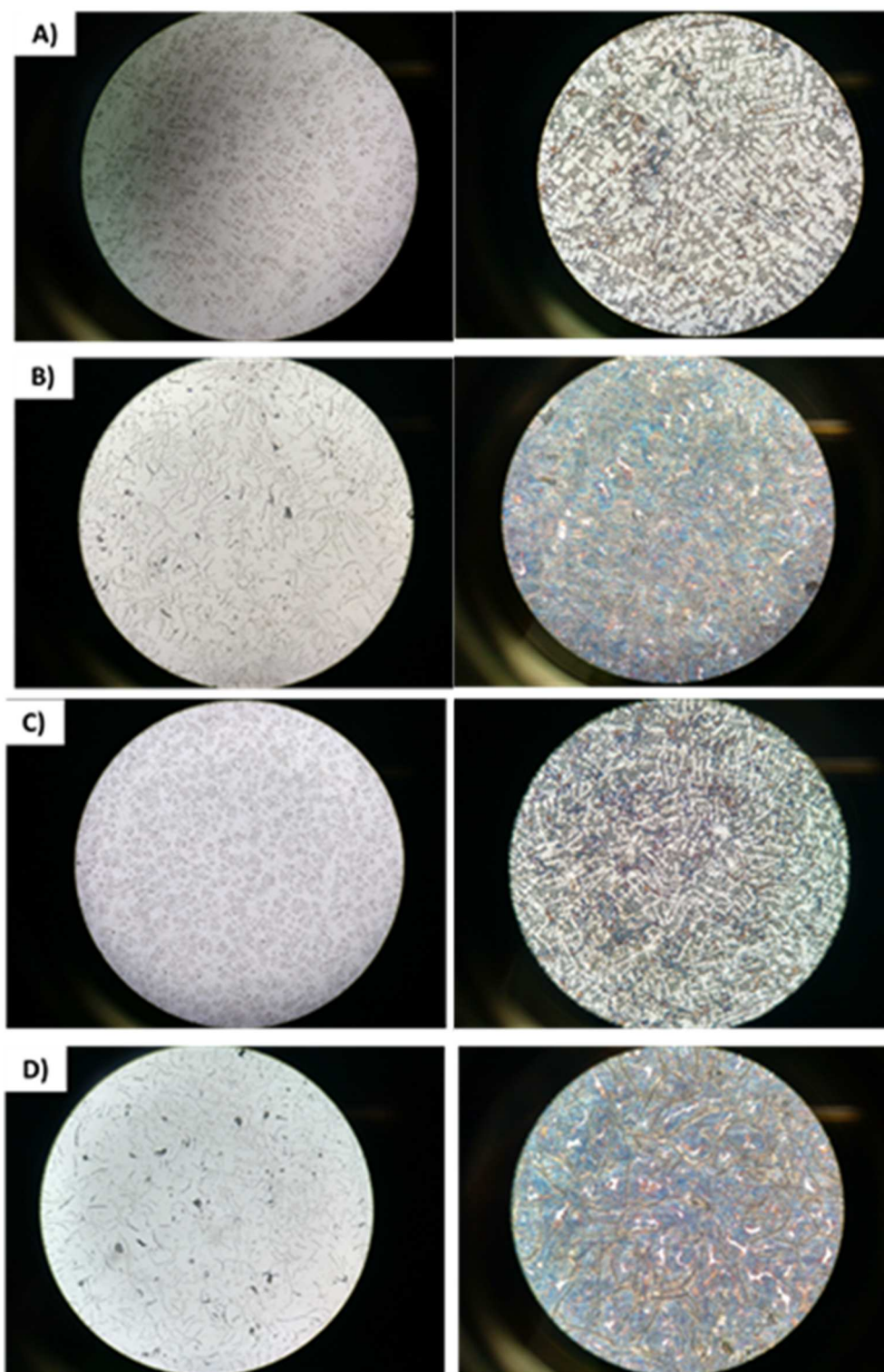
En la **Tabla 6.1.** se indica la clasificación obtenida para los distintos soportes según la forma, distribución y tamaño del grafito, y las proporciones de ferrita/perlita presentes en la matriz según las micrografías patrón de la UNE-EN ISO 945-1<sub>[27]</sub> y UNE-EN ISO 78001<sub>[23]</sub>, respectivamente.

Soporte	Grafito (UNE-EN ISO 945-1)			Ferrita/perlita (UNE-EN ISO 78001)
	Forma	Distribución	Tamaño	
<b>Fundición I</b>	Interdendrítica	Tipo D	8	$\geq 10\%$ de ferrita (F+P)
<b>Fundición II</b>	Laminar	Tipo A y C	4 / 7	$\leq 10\%$ de ferrita (P)
<b>Fundición III</b>	Interdendrítica	Tipo D	8	$\geq 10\%$ de ferrita (F+P)
<b>Fundición IV</b>	Laminar	Tipo A y C	5 / 7	$\leq 10\%$ de ferrita (P)

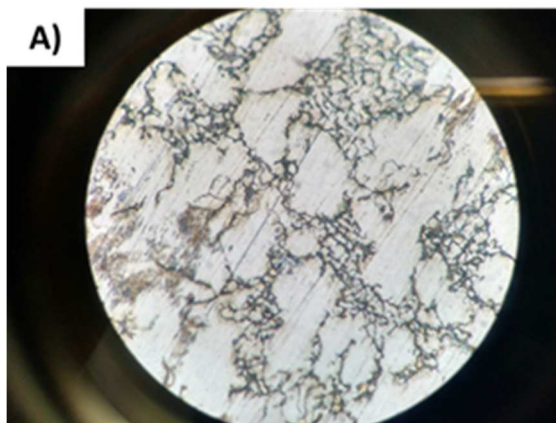
**Tabla 6.1.** Clasificación de los soportes según su forma, distribución y tamaño del grafito mediante la UNE-EN ISO 945-1<sub>[27]</sub> y la proporción de ferrita/perlita en la matriz mediante la UNE-EN ISO 78001<sub>[23]</sub>.

Como se puede apreciar en la **Tabla 6.1.** y en la **Figura 6.2.**, los soportes I y III corresponden a una distribución interdendrítica en laminillas del tipo D, que posiblemente sea el resultado de un subenfriamiento significativo. En la **Figura 6.3.** se puede observar a 500 aumentos la naturaleza laminar de las mismas. El grafito de tipo D ferritiza fácilmente la matriz que se encuentra a su alrededor y además ofrece poca resistencia al desgaste. Por otra parte, los soportes II y IV muestran una distribución laminar del tipo A (mayoritaria) y C (minoritaria) con una matriz perlítica. La distribución del tipo A proporciona buenas características mecánicas mientras que el tipo C, presente exclusivamente en las hipereutécticas, presenta baja resistencia a la tracción.



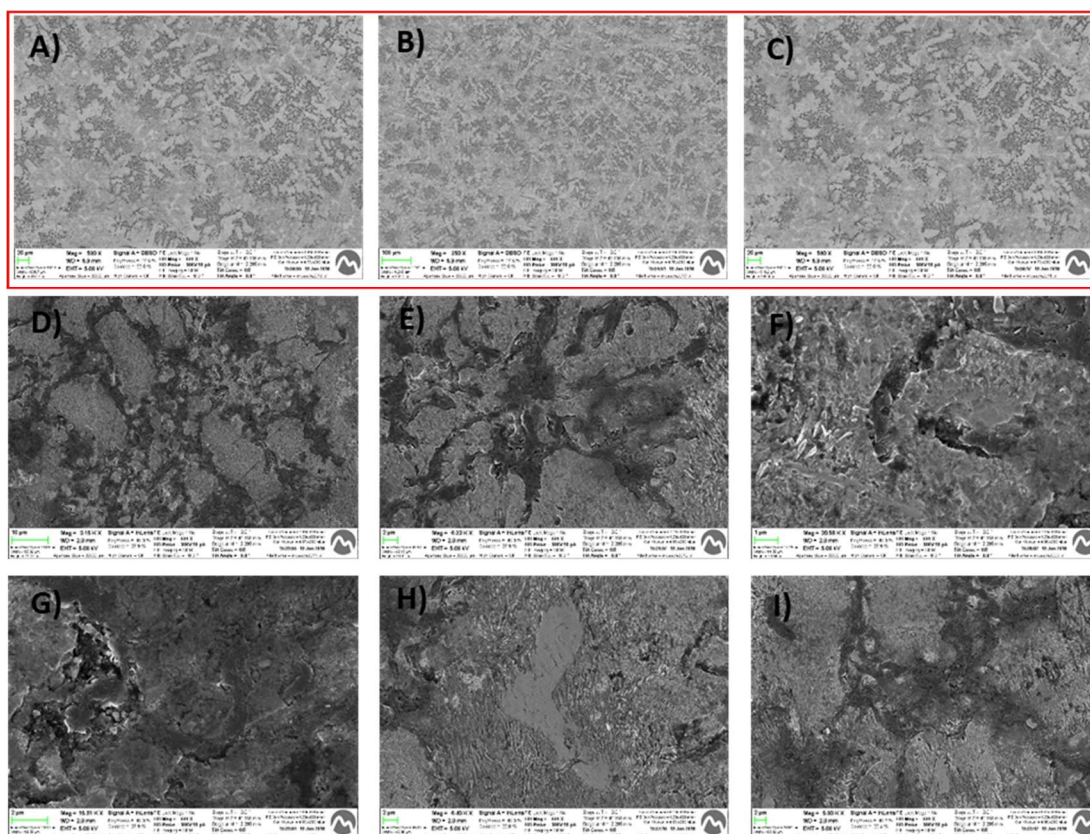


**Figura 6.2.** Micrografías de la microestructura de los distintos soportes.: A) Fundición I, B) Fundición II, C) Fundición III y D) Fundición IV. Izq. muestra sin atacar a 100 aumentos y Dcha. muestra atacada con Nital 2% a 200 aumentos.



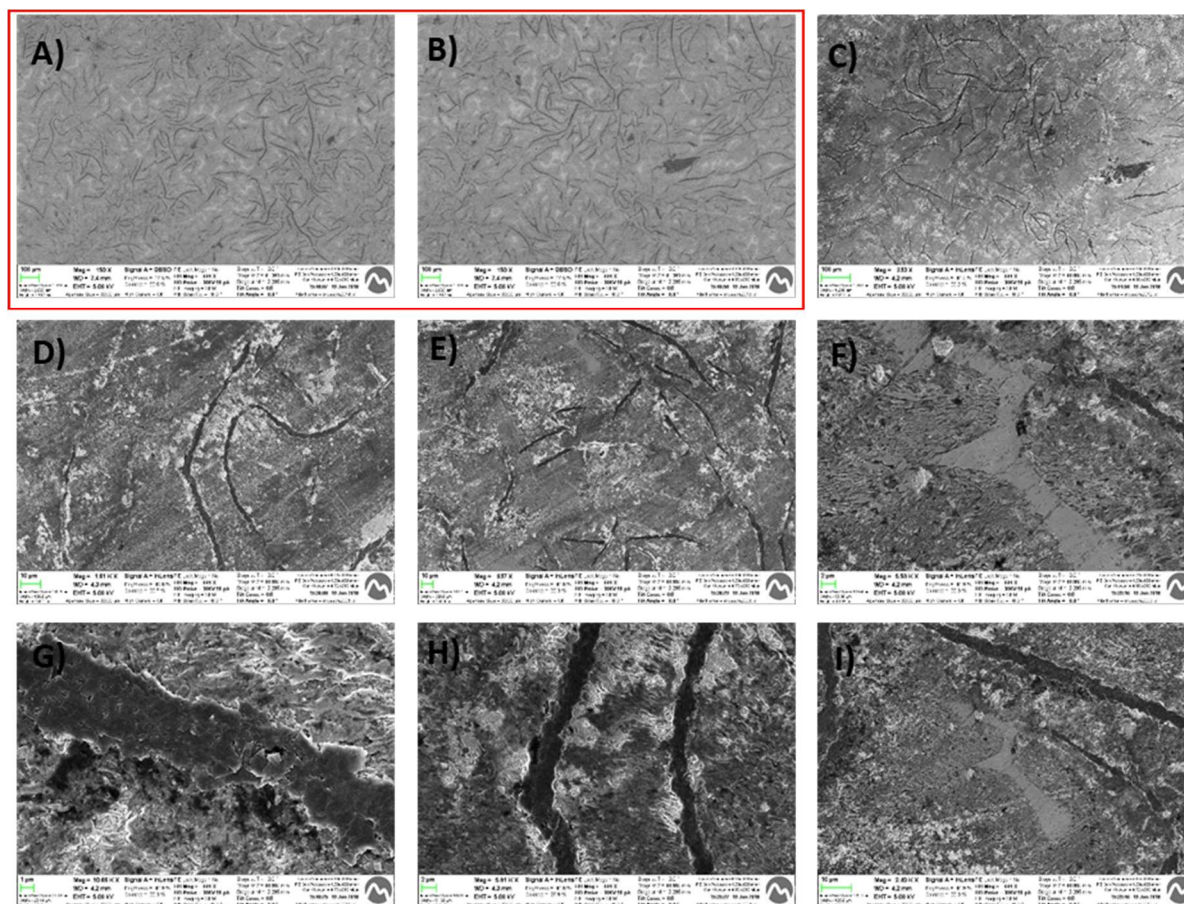
**Figura 6.3.** Micrografía de la microestructura del soporte I a 500 aumentos.

En la **Figura 6.4.** y **Figura 6.5** se muestran las imágenes de MEB obtenidas de la microestructura de los soportes I y IV, en las cuales se puede apreciar un desprendimiento de carbono en las láminas y/o laminillas.



**Figura 6.4.** Imágenes de MEB de la microestructura atacada con Nital 2% del soporte I.





**Figura 6.5.** Imágenes de MEB de la microestructura atacada con Nital 2% del soporte IV.

A pesar de no determinar la composición química de los soportes, en la **Tabla 6.2.** se indica a modo de estimación los posibles rangos utilizados en los soportes. Actualmente, puesto que no existe una composición química normalizada, se deja al criterio del fundidor con la única obligación del cumplimiento las características mecánicas prescritas.

	Porcentajes en masa de cada elemento y microestructura					Metalografía	UNE 36 111 (no vigente)
	C %	Si %	Mn %	P %	S %		
<b>No.20 / EN-GJL-150 / FG15</b>	3.2-3.5	1.8-2.4	0.5-0.9	≤0.2	≤0.12	Ferrita + Perlita	-
<b>No.30 / EN-GJL-200 / FG20</b>	3.0-3.5	1.4-2.0	0.7-1.0	≤0.15	≤0.12	Perlita	≤10% de ferrita

**Tabla 6.2.** Porcentajes en masa de cada elemento (ASTM A48<sub>[26]</sub>)

### 6.2.2. Dimensiones y tolerancias

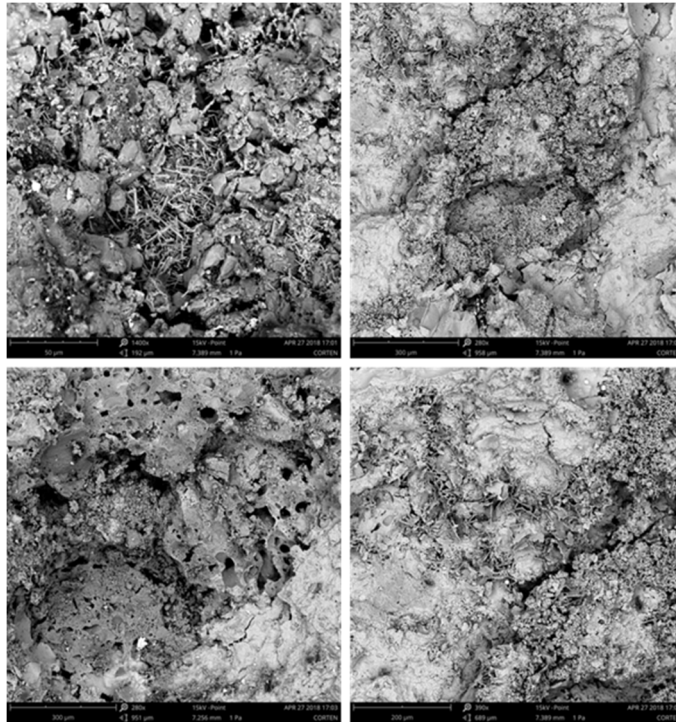
Los soportes presentan a simple vista buena excentricidad, por este motivo se descarta la necesidad de realizar un análisis dimensional exhaustivo. Los espesores mínimos obtenidos en la parte superior de los soportes II, III y IV se encuentran en 1 cm aproximadamente, mientras que el soporte I presenta un valor inferior. En la **Tabla 6.3.** se indican los espesores encontrados en la base de los soportes. Tal y como se puede observar los soportes I y II han sufrido una pérdida significativa por deslaminación.

Soporte	Espesor en la base en buen estado (mm)	Espesor en la base en mal estado (mm)	Rango de espesor empleado en parte superior (mm)
Fundición I	10.00	0.86	7.30 - 10.15
Fundición II	10.00	0.60	10.55 - 19.00
Fundición III	14.00	-	9.00 - 15.00
Fundición IV	14.00	-	10.00 - 14.00

**Tabla 6.3.** Espesores de la base y columna de los distintos soportes.

### 6.2.3. Aspecto y defectos de fundición

El principal defecto presente en los soportes es la presencia de arena adherida en la pared interna. En la **Figura 6.6.** se muestran las imágenes de MEB obtenidas de las pequeñas incrustaciones de arena del soporte IV donde presenta óxidos en su superficie. Sin embargo, este defecto se considera de gravedad leve.



**Figura 6.6.** Imágenes de MEB de la pared interna del soporte IV.

Asimismo, el soporte I presenta dos poros internos con un diámetro de 2-3 mm y muy cercanos entre sí [Figura 6.7], formados como consecuencia de la formación de burbujas de gas y posiblemente generados por causas externas del metal, como por ejemplo humedad en el molde, ya que se encuentran muy localizados. Este defecto se debe de tener especial interés en la zona de interfase, ya que su presencia reduce significativamente el espesor final de la pared, y consecuentemente su durabilidad.



**Figura 6.7.** Defecto de fundición: porosidad interna en el soporte I.

#### 6.2.4. Propiedades mecánicas

Los ensayos de dureza son, junto con los de tracción, los más utilizados en la selección y control de calidad de los materiales, por este motivo han sido seleccionados como las propiedades mecánicas a definir en los soportes.

La dureza es una condición de la superficie del material. No existe una definición única acerca de la dureza y se suele definir en relación al método particular que se utilice para la determinación de su valor. En este caso, la dureza de los soportes ha sido determinada mediante el ensayo de Rockwell B<sub>57</sub> (HRB), cuyas medidas definen la resistencia a la indentación permanente bajo cargas estáticas y dinámicas utilizando una esfera de acero de 1/16" de diámetro.

Posteriormente, y con el fin de comparar los resultados obtenidos con los normalizados en la UNE-EN 1561 [21], los valores de dureza se pasan a escala de dureza Brinell (HB). Cabe destacar que la dureza en fundición gris es relativamente elevada, en la **Tabla 6.4.** se proporciona las durezas Brinell estimadas para las designaciones de mayor interés según la UNE-EN 1561[21] y las encontradas en los distintos soportes.

Por otro lado, conociendo la dureza Brinell de un material se puede estimar su resistencia a la tracción. La ecuación para llevar a cabo dicha correlación en la fundición gris se indica a continuación:

$$\sigma_e = 0,1 \cdot HB \text{ [kg/mm}^2\text{]} \quad (\text{Ec. 6.1.})$$

Donde HB es el valor de la dureza en la escala Brinell.

Sin embargo, la estimación obtenida a través de la **Ec. 6.1.** debe ser tomada como una primera aproximación y no como un valor enteramente fiable, ya que cualquier irregularidad superficial puede causar una estimación errónea.

Como se puede observar en la **Tabla 6.4.**, las durezas y las resistencias a la tracción determinadas para los soportes II y IV se encuentran por debajo de los límites definidos para la designación EN-GJL-150, mientras que el soporte III se puede incluir dentro de esta designación. El soporte I por su parte presenta los valores indicados para la designación EN-GJL-200.

Designación (UNE-EN 1561) y soportes	Dureza Brinell (HB)	Resistencia a la tracción (MPa, Rm)
EN-GJL-150	155 a 215	150 a 250
EN-GJL-200	175 a 235	200 a 300
EN-GJL-250	195 a 245	250 a 350
Fundición I	211-203	203
Fundición II	135-140	135
Fundición III	165-167	163
Fundición IV	147-149	145

**Tabla 6.4.** Valores de dureza Brinell y resistencia a la tracción para algunas designaciones normalizadas y las encontradas en los soportes.

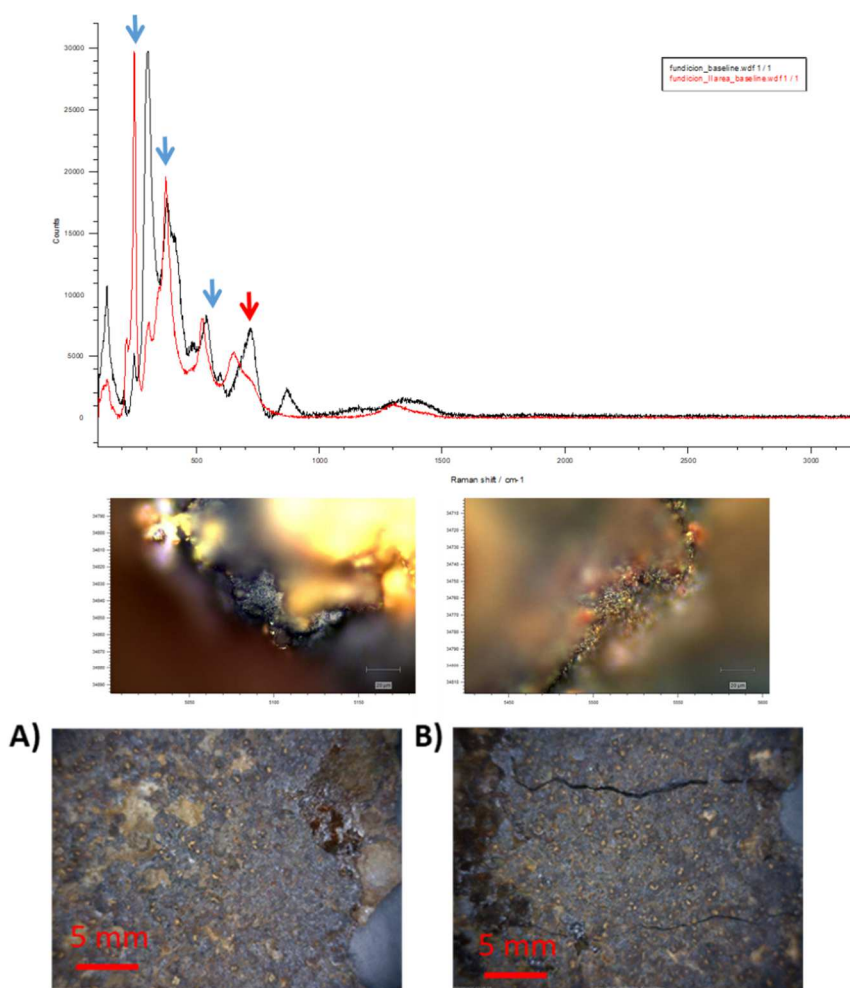
### 6.3. Caracterización de los productos de corrosión formados durante su vida útil

La presencia de herrumbre en los soportes se localiza principalmente en la pared interna, en especial en la base del soporte, y en la pared externa de la zona semienterrada. La naturaleza de las herrumbres ha sido analizada mediante espectroscopía microRaman. El análisis se ha llevado a cabo realizando análisis puntuales en zonas de interés.

Los espectros Raman de las herrumbres formadas en la zona de deslaminación **[Figura 6.8.]** del soporte II indican la presencia mayoritaria de lepidocrocita, cuyas bandas principales se encuentran aproximadamente en 255, 350 y 530  $\text{cm}^{-1}$ . También se detecta la presencia de maghemita en 720  $\text{cm}^{-1}$ .

<sup>1</sup>.





**Figura 6.8.** Espectros de Raman de la herrumbre formada en la zona de deslaminación del soporte II.

## 6.4. Comportamiento frente a los ensayos de corrosión

### 6.4.1. Ensayos cíclicos acelerados de corrosión

#### 6.4.1.1. Inspección visual de las capas de herrumbre formadas

En la **Figura 6.9.** y en la **Figura 6.10.** se encuentran todas las probetas extraídas durante el ensayo cíclicos.



**Figura 6.9.** De izquierda a derecha y de arriba abajo: A1, A4, A2, A5, A3 y A6.



**Figura 6.10.** De izquierda a derecha y de arriba abajo: B1, B4, B2, B5, B3 y B6.



La probeta A1 que se ensayó en Bisulfito Sódico durante 10 días (240 ciclos) presenta óxidos de tono oscuro con marcas blancas originadas por las sales precipitadas sobre la muestra. Una vez retiradas esas sales adquiere un tono completamente negro. La superficie atacada posee una textura lisa y parece no presentar ninguna pérdida de herrumbre al decaparla, aun así, hay evidencias de una transferencia de óxido, de color negro similar al polvo, con el medio corrosivo. La probeta A4 sometida al mismo número de ciclos en NaCl presenta en cambio una coloración naranja muy intenso. La superficie es completamente rugosa y el desprendimiento de herrumbre en forma de polvo se hace evidente.

Las probetas A2 y A5 ensayadas durante 20 días (480 ciclos) demuestran unas tonalidades más oscuras que las probetas extraídas 10 días antes. Las superficies poseen las cualidades ya mencionadas. En cuanto a la pérdida de herrumbre se ha visto acentuada en ambas probetas.

La probeta A3 (ensayada durante 720 ciclos) presenta ahora una superficie algo rugosa y una acumulación de óxidos superficiales negros. La probeta A6 por su parte mantiene una fina y rugosa capa de óxido muy quebradiza.

La probetas B1 y B4 se comportaron los ciclos de humectación y secado exactamente igual que las probetas A1 y A4.

Las probetas B2 y B3 presenta una tonalidad mas clara en comparacion a la probeta A2 y A3. A pesar de eso tanto las características superficiales como las de desprendimiento de herrumbre son las mismas. La probeta B5 y B6 tambien presenta una tonalidad mas clara. Su herrumbre parece estar muy poco adherida y se desprende en forma de laminas con el mero contacto.

La inspeccion visual nos indica que en primera instancia existe una ligera diferencia visual en la coloracion de la capa de herrumbre dependiendo de si se trata de fundicion laminar o interdendrítica. A pesar de todo la perdida de herrumbre parece igual de evidente en ambos casos y sera necesario analizar los resultados del estudio de velocidad de corrosion para poder apreciar una diferencia en las perdidas de masa.

#### **6.4.1.2. Determinación de la pérdida de masa y velocidad de corrosión**

Las pérdidas de masa de las probetas son las siguientes [Tabla 6.5.]:

Nº	peso inicial (g)	peso final (g)	Diferencia (g)
A1	134,301	134,118	0,183
A2	117,537	117,410	0,127
A3	189,961	189,689	0,272
A4	192,226	192,024	0,202
A5	168,516	168,188	0,328
A6	187,907	187,517	0,390
B1	82,641	82,432	0,209
B2	101,143	100,945	0,198
B3	120,480	120,141	0,339
B4	77,435	77,173	0,262
B5	96,692	96,365	0,327
B6	95,846	95,449	0,397

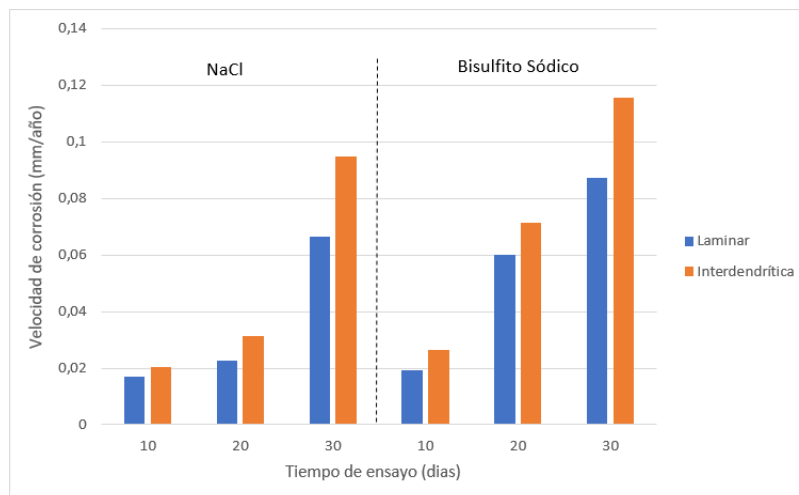
**Tabla 6.5.** Pérdida de masas de las probetas de fundición.

Con ellas, utilizando la ecuación **Ec. 4.1.** obtenemos las velocidades de corrosión  
[Tabla 6.6.]

Nº	velocidad de corrosión (mm/año)
A1	0,0169
A2	0,0228
A3	0,0665
A4	0,0192
A5	0,0601
A6	0,0874
B1	0,0203
B2	0,0314
B3	0,0946
B4	0,0263
B5	0,0715
B6	0,1155

**Tabla 6.6.** Velocidad de corrosión (mm/año).

A pesar de que no se aprecian diferencias significativas en entre las probetas de la columna III y IV, si se puede ver un aumento de la velocidad de corrosión con el tiempo, tal y como se muestra en la **Figura 6.11**.



**Figura 6.11.** Comparativa entre las velocidades de corrosión a lo largo del tiempo.

Así pues, podemos determinar que la velocidad de corrosión no ha llegado a estabilizarse haciendo que la pérdida de masa sea más pronunciada a lo largo del tiempo. En cuanto al comportamiento en función del medio, las probetas sufren una pérdida de masa más pronunciada en ambientes de ámbito industrial (ricos en bisulfito sódico).

## 6.4.2. Ensayo de inmersión constante

### 6.4.2.1. Inspección visual de las capas de herrumbre formadas

Puesto que el comportamiento frente a la corrosión de la columna III y IV parece ser el mismo solo se ha procedido al estudio de los efectos de la inmersión constante de la columna IV, al ser esta la única normalizada.

En la **Figura 6.12.** podemos ver el efecto de los diferentes medios corrosivos en las probetas A7, A8 y A9 después de 30 días.



**Figura 6.12.** Probetas resultantes del ensayo de inmersión constante durante 30 días. De izq. a drcha.: A9 (Bisulfito sódico), A8 (agua destilada) y A7 (NaCl).

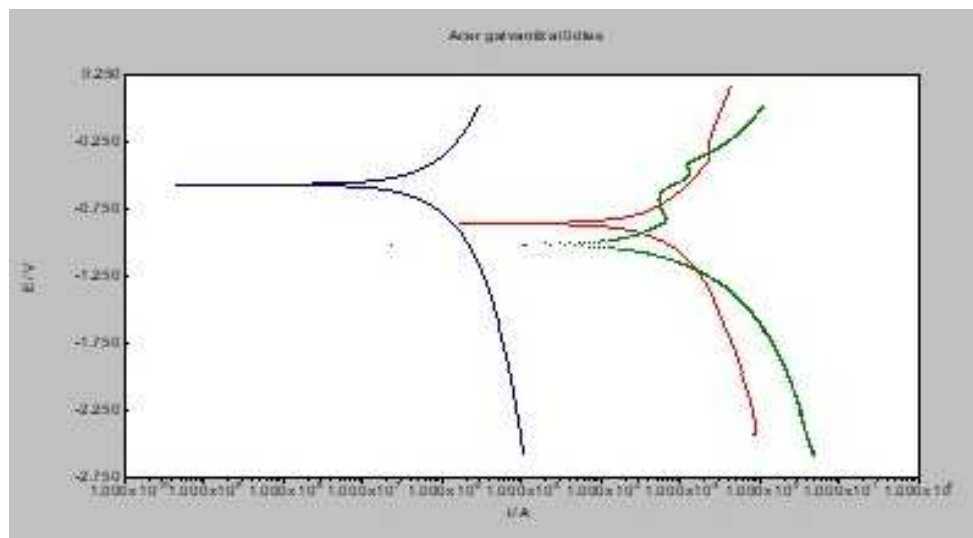
La probeta A9, que durante los primeros días parecía presentar principalmente la misma coloración negra que las probetas del ensayo de humectación/secado, ha desarrollado una serie de óxidos de color más marronoso en los cantos de la superficie. Además, los precipitados de bisulfito han tomado forma de pequeñas aglomeraciones cristalinas. Todo esto sumado hace que la suavidad de la superficie negra se torne completamente irregular.

La probeta A8 por su parte presenta una tonalidad naranja-marronosa oscura en toda su superficie a excepción de la zona central donde esta capa de óxido se ha terminado por desprender por completo, dejando ver así el metal de debajo. Su rugosidad, menor que la de las probetas A9 y A7, es aun así bastante pronunciada.

Por último, la probeta A7 presenta una capa de óxido de fácil desprendimiento de color naranja muy intenso.

#### 6.4.2.2. Determinación de la velocidad de corrosión a partir de los ensayos Tafel

El estudio Tafel realizado a las tres muestras nos proporciona unas velocidades de corrosión teóricas para cada uno de los medios ensayados [Figura 6.13.]. Los resultados se muestran en la **Tabla 6.7.**:



**Figura 6.13.** Resultados del Tafel para las probetas A7 (verde), A8 (azul) y A9 (rojo).

Nº	Medio corrosivo	Velocidad de corrosión (mm/año)	Figura
A7	NaCl	2,685	B6.1.
A8	H2O	0,0034	B6.2.
A9	Bisulfito Sódico	2,263	B6.3.

**Tabla 6.7.** Velocidades de corrosión obtenidas del Tafel

Según el estudio Tafel parece haber una diferencia muy significativa entre el efecto de los medios marinos e industriales (con velocidades de corrosión prácticamente iguales) en comparación con el agua de lluvia, cosa que pudimos comprobar al observar el desprendimiento de la herrumbre superficial de las probetas.

## 7. ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL

Para la realización de este trabajo se han requerido la utilización de una serie de recursos cedidos por el *Ajuntament de Barcelona* y por la *Escola de Enginyeria de Barcelona Est*, organismos comprometidos con el medioambiente. Es necesario por lo tanto analizar el posible impacto ambiental de dichos recursos a fin de asegurarse que este es mínimo o nulo.

Fueron necesarios:

- 245 litros de agua destilada
- 4,2 kg de sal
- 4,35 l de bisulfito sódico
- 50 ml de Nital
- 44 probetas de metal extraídas de 6 bases de farola

El procedimiento para la gestión de dichos residuos fue el siguiente:

- El agua destilada, junto con la sal y el bisulfito sódico, se vertieron en los desagües habilitados correspondientes de las instalaciones de la *EEBE*
- El Nital sobrante fue guardado para futuros ensayos de microscopia
- Las 44 probetas fueron depositadas en el correspondiente contenedor de residuos metálicos y las farolas de donde provenían fueron llevadas a ... para su correcto reciclaje.

Por otra parte, este trabajo tiene como objetivo dar un mayor conocimiento frente a las condiciones necesarias para la instalación de farolas. Esto llevara a que mediante los conocimientos recopilados en él se descarten aquellas farolas que, debido a sus condiciones de fabricación, no posean esperanzas de vida lo suficientemente largas, reduciendo así el número de recambios y recursos necesarios para su reparación o sustitución y por lo tanto disminuyendo también la cantidad de residuos generados.



## CONCLUSIONES

A continuación se exponen las conclusiones referentes al proyecto. Se han agrupado en dos grupos para cada uno de los tipos de farola estudiados: características exigidas (*“Características necesarias de las columnas y báculos”*) y control de calidad (*“Control de calidad en la recepción de farolas”*).

### Acero Corten

#### Características necesarias de las columnas y báculos.

##### Material base de las columnas y báculos

- El tipo de acero patinado empleado en las columnas y báculos deberá cumplir la calidad mínima de S235J0W, con un porcentaje en masa máximo de P y S de 0.1 y 0.015 %, respectivamente. Los porcentajes en masa de los distintos elementos se indican en la **Tabla 1**.

C % máx.	Si % máx.	Mn %	P máx. <sup>a</sup>	S % máx.	Cr %	Cu %	Otros
0.16	0.45	0.15-0.70	0.1	0.015	0.35-0.85	0.20-0.60	Máx. de Ni 0.70%

**Tabla 1.** Porcentajes en masa permitidos de cada elemento.

- Proporcionar un dossier equivalente a la UNE-EN 40<sub>[10]</sub> con cálculos mecánicos, de resistencia, dimensionales, etc.

##### Dimensiones y tolerancias

- El espesor de la chapa empleada estará en función de las dimensiones de las columnas y báculos que se detallan en los planos correspondientes. El espesor nominal obtenido en el cálculo del modelo será incrementando en un 1mm, tal y como se especifica en la Instrucción del acero estructural (EAE) aprobada en el RD 751/2011<sub>[9]</sub>.

##### Protección anticorrosión de la pátina o capa pasivante

- Las superficies deben ofrecer un aspecto aceptable tras su exposición a la intemperie. Para ello puede ser necesaria su limpieza por chorreado mediante agua a presión, y así garantizar una textura similar y un color homogéneo. Los procedimientos de preparación

de superficie descritos en la UNE-EN ISO 12944-4:1999<sup>[43]</sup> pueden ser utilizados como métodos alternativos.

- La producción de escorreduras de óxido no serán motivo de disputa o rechazo.
- Los soportes destinados a ser semienterrados en el pavimento o suelo deberán incluir una protección adicional contra la corrosión.

### **Recubrimientos anticorrosivos adicionales**

- La base del soporte incluirá una protección adicional contra la corrosión. La aplicación mínima del recubrimiento se realizará en la parte interna y externa hasta alcanzar la puerta de registro. El recubrimiento adicional deberá ser apto como mínimo para la categoría de corrosividad C3. La ubicación del soporte deberá mantener una distancia mínima con la costa de 1 Km, distancias inferiores se deberá evaluar la necesidad de la protección completa de la columna.
- Los métodos de preparación de superficie a pintar como los recubrimientos anticorrosivos empleados en sustratos de acero son admisibles para los soportes de acero patinado, siempre y cuando el espesor nominal obtenido no sea alterado. Los aspectos a tener en cuenta en la preparación de sustratos de acero se describen en la UNE-EN ISO 8501<sup>[39]</sup>, ISO 8502<sup>[40]</sup>, ISO 8503<sup>[41]</sup> y ISO 8504<sup>[42]</sup>, mientras que los aspectos referentes a la protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pinturas protectores se reportan en la UNE-EN ISO 12944<sup>[37]</sup>.

### **Soldadura**

- El cordón de soldadura deberá presentar una buena coincidencia de color y resistencia a la corrosión equivalente al material de base. Por ello, el material de aportación presentara un contenido de 2,5% de Ni aprox. o similar composición a la del metal base, tal y como indica la UNE-EN 10025-5:2004<sup>[12]</sup>.
- Todos los tipos de aceros indicados son soldables, pero su soldabilidad no es ilimitada para los diferentes procesos de soldadura. Por ello, el suministrador deberá facilitar a la dirección facultativa los procedimientos empleados en las soldaduras. Para la utilización del soldeo por arco se deberá cumplir las exigencias especificadas en la EN 1011-2:2004<sup>[14]</sup>.

### **Pernos de anclaje**

- Estarán contruidos con barra redonda de acero de calidad mínima del tipo S235JR, según la UNE-EN 10025-2<sup>[11]</sup>, (denominación DIN: St 37-2 y denominación UNE 36011-12<sup>[44]</sup>; F111). La rosca de los pernos cumplirá la Norma UNE 17704:2002<sup>[45]</sup>.

- La métrica y longitud del perno estarán en función de las dimensiones de las columnas y báculos que se detallan en los planos correspondientes. Los pernos irán provistos de dos tuercas y arandelas.
- Para evitar la aparición de pares galvánicos u otros fenómenos corrosivos se deberá aislar eléctricamente las superficies de ambos metales mediante pintado u otros procedimientos.

## Control de calidad en la recepción de las farolas

### Documentación general

La recepción de los productos se controlará previa presentación de los correspondientes certificados emitidos por laboratorios acreditados, por ENAC o entidad equivalente y fichas técnicas en los casos que procedan. A continuación, se indican los distintos certificados a requerir.

- **Fabricación y acabado.**
  - Certificado de composición química de la chapa de acero utilizada para la fabricación de la columna o báculo.
  - Método de preparación de la superficie empleados en la activación de la pátina.
  - Certificado de espesor de la chapa de acero utilizada para la fabricación de la columna o báculo.
  - Certificados de composición química del material base correspondientes a los pernos de anclaje.
  - Declaración CEE de conformidad del fabricante de la farola.
  - Certificado de homologación CEE.
  - Certificado de garantía de la protección contra la corrosión por un periodo mínimo de tiempo de 20 años.
- **Pintura de protección adicional.**

La documentación requerida en este apartado se orienta en la puesta de conocimiento de los procedimientos y materiales empleados en la protección adicional.

  - Certificado de composición y ficha técnica de los productos para la limpieza superficial, utilizados.
  - Certificado de composición y ficha técnica de los productos para la preparación superficial, utilizados.
  - Certificado de composición y ficha técnica de la pintura para la protección superficial adicional utilizada.

## Ensayos de control de calidad

Para la realización de estos ensayos se empleará una probeta maestra situada en la columna o báculo, tal y como se procede en los soportes basados en acero galvanizado.

Los resultados de los ensayos irán acompañados de los correspondientes certificados emitidos por laboratorios acreditados, así como de los correspondientes certificados de calibración ISO de los equipos utilizados.

- Determinación de la composición del acero de base mediante espectroscopia de emisión atómica.
- Determinación del espesor de la chapa de acero mediante ultrasonidos.
- Determinación morfológica y/o química estructural de la capa pasivante mediante métodos micrográficos y/o control visual (coloración, compactación y homogeneidad).
- Determinación del comportamiento frente a la corrosión mediante ensayos electroquímicos.

## Control de calidad durante la estabilización de la pátina

Se recomienda realizar un seguimiento de los soportes instalados en los primeros 5 años de exposición en ambientes urbanos y 10 años en ambientes marinos (e.j. cercanos a la playa).

# Fundición de hierro

## Características necesarias de las columnas y báculos.

### Propiedades mecánicas/composición química/microestructura de fundición gris

- La fundición de hierro empleado en los soportes deberá cumplir la calidad mínima de EN-GJL-150 (UNE 1561<sub>[21]</sub>).
- La distribución del grafito deberá ser laminar del tipo de A y de tamaño 5 (UNE-EN ISO 945-1:2012<sub>[27]</sub>).

### Dimensiones y tolerancias

- Proporcionar un dossier equivalente a la norma UNE-EN 40<sub>[10]</sub> con cálculos mecánicos, de resistencia, dimensionalidad, etc.

- No superar el 10 % en la excentricidad y tolerancia máxima respecto al espesor promedio según el diseño y cálculo estructural del soporte.
- El espesor mínimo de la pared de la base del soporte será de 10 mm.

### **Aspecto y estado interno**

- **Limpieza/Rebarbado:**
  - Los soportes deberán entregarse limpios, y así garantizar la ausencia de arena suelta o calcinada que pueda desprenderse en servicio y de cualquier otro tipo de suciedad superficial que pueda ir en detrimento de su maquinabilidad o comportamiento en servicio. Esto se conseguirá mediante chorro de granalla, arena o cualquier otro de los procedimientos usualmente empleados.
  - Los soportes deberán entregarse libres de bebederos, mazarotas, rebarbas y cualquier otro defecto superficial que pueda perjudicar el mecanizado, las características de la pieza o su buena presentación.
- **Defectos internos/externos**
  - Los soportes deberán estar libres de poros, rechupes o cualquier otro defecto que impida la correcta utilización de las mismas o que su vida útil se vea perjudicada significativamente. La pérdida de espesor en la base del soporte superior al 10% será motivo de rechazo.
  - Los defectos superficiales que no afecten a la utilización de la pieza podrán repararse por escarpado o esmerilado. En el caso de que presenten defectos que requieran reparación por soldeo, será necesario informar al comprador. Por reparación no deberá entenderse el enmascaramiento u ocultación de defectos.

### **Recubrimientos anticorrosivos adicionales**

- El soporte incorporará una protección adicional contra la corrosión. El recubrimiento adicional deberá ser apto como mínimo para la categoría de corrosividad C3.
- Los métodos de preparación de superficie a pintar como los recubrimientos anticorrosivos empleados en sustratos de acero son admisibles para los soportes de fundición de hierro. Los aspectos a tener en cuenta en la preparación de sustratos de acero se describen en la UNE-EN ISO 8501<sup>[39]</sup>, ISO 8502<sup>[40]</sup>, ISO 8503<sup>[41]</sup> y ISO 8504<sup>[42]</sup>, mientras que los aspectos referentes a la protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pinturas protectores se reportan en la UNE-EN ISO 12944<sup>[37]</sup>.

## Soldadura

- Las soldaduras presentes en la columna deberán cumplir las exigencias especificadas en la UNE-EN 1011-8<sup>[33]</sup>.
- El suministrador deberá facilitar a la dirección facultativa los procedimientos y materiales empleados en las soldaduras.

## Pernos de anclaje

- Estarán contruidos con barra redonda de acero ordinario de calidad mínima del tipo S235JR, según la UNE-EN 10025-2<sup>[11]</sup>, (denominación DIN: St 37-2 y denominación UNE 36011-12<sup>[44]</sup>; F111). La rosca de los pernos cumplirá la Norma UNE 17704:2002<sup>[45]</sup>.
- La métrica y longitud del perno estarán en función de las dimensiones de las columnas y báculos que se detallan en los planos correspondientes. Los pernos irán provistos de dos tuercas y arandelas.
- Para evitar la aparición de pares galvánicos u otros fenómenos corrosivos se deberá aislar eléctricamente las superficies de ambos metales mediante pintado u otros procedimientos.

## Control de calidad a la recepción de las farolas

### Documentación general

La recepción de los productos se controlará previa presentación de los correspondientes certificados emitidos por laboratorios acreditados, por ENAC o entidad equivalente y fichas técnicas en los casos que procedan. A continuación, se indican los distintos certificados a requerir.

- **Fabricación y acabado.**

La documentación requerida corresponde a la misma exigida para los soportes y/o columnas basados en otros materiales.

- Certificado de distribución de la ferrita/perlita/grafito en la matriz (UNE-EN ISO 78001:2002<sup>[23]</sup> y UNE-EN ISO 945-1:2012<sup>[27]</sup>).
- Certificado de las propiedades mecánicas del material base: resistencia a la tracción (UNE-EN ISO 6892-1:2009<sup>[46]</sup>) y dureza (UNE-EN ISO 6506-1:2005<sup>[47]</sup>).
- Certificado de espesor de pared empleado en la fabricación de la columna o báculo.
- Certificados de composición química del material base correspondientes a los pernos de anclaje.
- Declaración CEE de conformidad del fabricante de la farola.
- Certificado de homologación CEE.

- Certificado de garantía de la protección contra la corrosión por un periodo mínimo de tiempo de 20 años.
- **Pintura de protección adicional**

El periodo mínimo exigido para el báculo y/o columna, mencionado en el apartado de fabricación y acabado, corresponde a la durabilidad deseada del soporte, independientemente de los componentes de protección que lo constituyan. Por este motivo, la documentación requerida en este apartado se orienta en la puesta de conocimiento de los procedimientos y materiales empleados en la protección adicional.

  - Certificado de composición y ficha técnica de los productos empleados en la limpieza y preparación superficial.
  - Certificado de composición y ficha técnica de la pintura empleada en la protección superficial adicional.

#### **Ensayos de control de calidad**

Las probetas a entregar son:

- Muestra colada aparte
- Muestra adosada al soporte (preferiblemente en la base del soporte y unas dimensiones mínimas de 4x4 cm<sup>2</sup>)

Las determinaciones propuestas se llevarán a cabo en la muestra colada aparte y en la probeta adosada en la base del soporte, o en su defecto en la muestra extraída del soporte. Los resultados de los ensayos irán acompañados de los correspondientes certificados emitidos por laboratorios acreditados, así como de los correspondientes certificados de calibración ISO de los equipos utilizados.

- Determinación de la resistencia a la tracción (UNE-EN ISO 6892-1:2009<sub>[46]</sub>) y/o dureza (UNE-EN ISO 6506-1:2005<sub>[47]</sub>).
- Determinación de la distribución de la ferrita/perlita en la matriz mediante la comparativa con una serie de micrografías patrón (UNE-EN ISO 78001:2002<sub>[23]</sub>).
- Determinación de la forma, distribución y tamaño del grafito en la matriz mediante la comparativa con una serie de micrografías patrón (UNE-EN ISO 945-1:2012<sub>[27]</sub>).
- Determinación de la excentricidad en la base del soporte mediante ultrasonidos.
- Determinación de los defectos externos en el soporte mediante control visual.
- Determinación de los defectos internos en el soporte mediante el control por ultrasonidos (UNE-EN 12680-3:2012<sub>[48]</sub>), y en su defecto se emplearán ensayos destructivos.



## COSTES DEL PROYECTO

Razón	Tiempo (h)	Precio/hora (€/h)	Total (€)
<b>Obtención de las muestras</b>			
• Operarios	14	40	560
• Corte de las probetas	8	50	400
• Desbaste y pulido	6	30	180
<b>Total obtención de las muestras</b>			<b>1.140</b>
<b>Estudio microestructural</b>			
• Operario	30	40	1.200
• Preparación de las muestras	24	15	360
• Microscopio óptico	6	9	54
<b>Total estudio microestructural</b>			<b>1.614</b>
<b>Ensayos</b>			
• Operario	15	20	300
• Ensayo de humectación/secado	1440	0,5	720
• Ensayo de inmersión constante	720	0,25	180
<b>Total ensayos</b>			<b>1.200</b>
<b>Análisis</b>			
• operario	64	45	2.880
• Microscopia electrónica de barrido (SEM)	8	187,50	1.500
• Espectroscopía de dispersión de rayos X (EDX)	8	120	960
• Análisis de velocidad de corrosión (Tafel)	25	50	1250
<b>Total análisis</b>			<b>6.590</b>
<b>Total sin IVA</b>			<b>10.544</b>
<b>21% IVA</b>			<b>2.214,24</b>
<b>Total con IVA</b>			<b>12.758,24</b>

## BIBLIOGRAFÍA

[1] *“Pla d’Il·luminació de Barcelona”*

Consell Municipal (ayuntamiento de Barcelona) Barcelona. Diciembre 2012. Se puede encontrar en:

<<http://ajuntament.barcelona.cat/ecologiaurbana/sites/default/files/Medida%20de%20Gobierno%20del%20Plan%20de%20iluminaci%C3%B3n%20de%20Barcelona%20%28en%20catal%C3%A1n%29.pdf>>

[2] *“Luz con chapuzas”*

Xavier Mas de Xaxàs (La Vanguardia) Barcelona. Febrero 2008. Se puede encontrar en:  
<<http://www.lavanguardia.com/vida/20080129/53431599054/en-barcelona-hay-centenares-de-farolas-que-no-funcionan-por-falta-de-mantenimiento.html>>

[3] *“Millora de l’enllumenat públic. Els cercles de comparació intermunicipal.”*

Blanca Martínez de Foix Romance (diputación de Barcelona) Barcelona. Noviembre 2015. Se puede encontrar en:

<[http://mediambient.gencat.cat/web/.content/home/ambits\\_dactuacio/atmosfera/contaminacio\\_luminica/jornades\\_cursos/3\\_cercles\\_comparacio\\_intermunicipal.pdf](http://mediambient.gencat.cat/web/.content/home/ambits_dactuacio/atmosfera/contaminacio_luminica/jornades_cursos/3_cercles_comparacio_intermunicipal.pdf)>

[4] *“Catalogo de alumbrado público”*

(Jovir S.L.) Murcia. 2017. SE puede encontrar en:

<<http://www.jovir.es/Jovir/wp-content/uploads/2017/11/jovir-catalogo-2017.pdf>>

[5] *“Catalogo de Alumbrado Público”*

(Escofet 1886 S.A) Barcelona. 2006.

[6] *“Catalogo Roura”*

(Roura S.A.) Barcelona. 2016. Se puede encontrar en:

<<http://iluminacionroura.es/wp-content/uploads/ES-EN-ILUMINACION-ROURA.pdf>>

[7] UNE-EN 10027-1:2017, Sistema de designación de aceros. Parte 1: Designación simbólica

[8] UNE-EN 10027-2:2017, Sistema de designación de aceros. Parte 1: Designación numérica.

[9] Real Decreto 751/2011, de 27 de mayo, por el que se aprueba la Instrucción de Acero Estructural (EAE).

- [10] UNE-EN 40-5: 2003, Columnas y báculos de alumbrado. Parte 5: Requisitos para las columnas y báculos de alumbrado de acero.
- [11] UNE-EN 10025-2:2006, Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Parte 2: Condiciones técnicas de suministro de los aceros estructurales no aleados.
- [12] UNE-EN 10025-5:2004, Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Parte 5: Condiciones técnicas de suministro de los aceros estructurales con resistencia mejorada a la corrosión.
- [13] *"Some Clarifications regarding literature on atmospheric corrosion of weathering steels"*  
I. Díaz, H. Cano, B. Chico, D. de la Fuente, and M. Morcillo, Department of Surface Engineering, Corrosion, and Durability, National Centre for Metallurgical Research (CENIM/CSIC). International Journal of Corrosion, vol. 2012, Article ID 812192
- [14] EN 1011-2:2004, Soldeo. Recomendaciones para el soldeo de materiales metálicos. Parte 2: Soldeo por arco de los aceros ferríticos.
- [15] *"Corrosión: Galvanic Corrosion"*  
(The Stainless Steel Information Cente) Se puede encontrar en:  
<<http://www.ssina.com/corrosion/galvanic.html>>
- [16] *"Alumbrado Exterior"*  
(Salvi S.L.) Barcelona. 2014. Se puede encontrar en:  
<[https://www.salvi.es/wp-content/files\\_mf/salvi\\_catalogo\\_general51.pdf](https://www.salvi.es/wp-content/files_mf/salvi_catalogo_general51.pdf)>
- [17] *"Columna Magolla"*  
(La Nave Fabricados) Alava. Se puede encontrar en:  
<[http://www.la-nave.com/ficha\\_tecnica.php?id=227](http://www.la-nave.com/ficha_tecnica.php?id=227)>
- [18] *"Catalogo: Alumbrado Público"*  
(Forjas Estilo Español) Madrid. Se puede encontrar en:  
<[http://www.forjasestilo.es/images/pdf/CATALOGO%20ALUMBRADO%20PUBLICO%202014\\_FORJAS%20ESTILO%20ESPANOL.pdf](http://www.forjasestilo.es/images/pdf/CATALOGO%20ALUMBRADO%20PUBLICO%202014_FORJAS%20ESTILO%20ESPANOL.pdf)>
- [19] *"Columna Modelo CRA-20170"*  
(R.Ros Alguer S.A.) Barcelona. Se puede encontrar en:  
<<http://www.alumbrado-publico-ros.es/uploads/files/castiron-cra/ftp-cra-20170.pdf>>

- [20] UNE-EN 1560:2011, Fundición. Sistema de designación para fundición de hierro. Designación simbólica y numérica.
- [21] UNE-EN 1561:2012, Fundición. Fundición gris.
- [22] UNE-EN 1563:2012, Fundición. Fundición de grafito esferoidal
- [23] UNE-EN ISO 78001:2002, Industrias de la fundición. Distribución de la ferrita/perlita en la matriz de las fundiciones grises y de grafito esferoidal
- [24] *"Tabla de materiales Fundimeca"*  
(Fundimeca) Gipuzkoa. Se puede encontrar en:  
<<http://www.fundimeca.com/images/tabla-materiales-fundimeca.pdf>>
- [25] UNE 36111:1973, Fundición gris. tipos, características y condiciones de suministro de piezas moldeadas
- [26] ASTM A48. Standard Specification for Gray Iron Castings
- [27] UNE-EN ISO 945-1:2012, Designación de la microestructura de la fundición de hierro. Parte 1: Clasificación del grafito por análisis visual. (ISO 945-1:2008)
- [28] *"Tabla de equivalencias"*  
(Fundiciones de Roda) Barcelona. Se puede encontrar en:  
<[http://www.fundicionesderoda.es/wp-content/uploads/2013/02/EQUIVALENCIAS\\_ESPECIFICACIO.pdf](http://www.fundicionesderoda.es/wp-content/uploads/2013/02/EQUIVALENCIAS_ESPECIFICACIO.pdf)>
- [29] ASTM A536, *Standard Specification for Ductile Iron Castings*
- [30] UNE 36118:1973, Fundición con grafito esferoidal. tipos y condiciones de recepción y suministro de piezas moldeadas
- [31] UNE-EN 1559-1:2011, Fundición. Condiciones técnicas de suministro. Parte1: Generalidades.
- [32] UNE-EN 1559-3:2012, Fundición. Condiciones técnicas de suministro. Parte 3: Requisitos adicionales para las piezas moldeadas de fundición de hierro.
- [33] UNE-EN 1011-8:2004, Soldeo. Recomendaciones para el soldeo de materiales metálicos. Parte 8: Soldeo de fundición de hierro.
- [34] UNE-EN 1011-1:1998, Soldeo. Recomendaciones para el soldeo de materiales metálicos. Parte 1: Directrices generales para el soldeo por arco.
- [35] UNE-EN ISO 4063:2011, Soldeo y técnicas conexas. Nomenclatura de procesos y números de referencia. (ISO 4063:2009, versión corregida 2010-03-01)

- [36] EN ISO 15609-1, Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Especificación del procedimiento de soldeo. Parte 1: Soldero por arco. (ISO 15609-1:2004)
- [37] UNE-EN ISO 12944, Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores.
- [38] *“Corrosión atmosférica de aceros patinables de nueva generación.”*  
Dr. Iván Díaz Ocaña, Universidad Complutense de Madrid (Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica), Madrid. 2013.
- [39] UNE-EN ISO 8501, Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Evaluación visual de la limpieza de las superficies.
- [40] UNE-EN ISO 8502, Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Ensayos para la evaluación de la limpieza de las superficies.
- [41] UNE-EN ISO 8503, Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos afines. Características de rugosidad de los sustratos de acero chorreados.
- [42] UNE-EN ISO 8504, Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Métodos de preparación de las superficies.
- [43] UNE-EN ISO 12944-4:1999, Pinturas y barnices. Protección de estructuras de acero frente a la corrosión mediante sistemas de pintura protectores. Parte 4: Tipos y preparación de superficies.
- [44] UNE 36011-12, Aceros aleados y no aleados para temple y revenido.
- [45] UNE 17704:2002, Rosca métrica ISO para usos generales. Medidas básicas.
- [46] UNE-EN ISO 6892-1:2009, Materiales mecánicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente.
- [47] UNE-EN ISO 6506-1:2005, Materiales metálicos. Ensayos de dureza Brinell. Parte 1: Método de ensayo.
- [48] UNE-EN 12680-3:2012, Fundición. Ensayo por ultrasonidos. Parte 3: Piezas moldeadas en fundición de grafito esferoidal.

## ANEXO A

### Acero corten

#### 1. Nomenclatura europea de los aceros patinables.

Las normas de nomenclatura europea vienen recogidas en las normas UNE-EN 10027-1:2017<sup>[7]</sup> (Designación simbólica) y UNE-EN 10027-2:2017<sup>[8]</sup> (Designación numérica).

##### 1.1. Designación Simbólica UNE-EN 10027-1:2017

Consta de una letra que determina la utilización de dicho acero, seguido del valor mínimo del límite elástico (MPa) para el espesor de pieza más bajo de la gama. A continuación, como símbolos adicionales aparecerán en letras y números que especificarán las características de dicho material.

**S XXX YY W Z + Z**

**S** – Acero de construcción

**XXX** – Límite elástico mínimo [MPa]

**YY** – Resiliencia [J]

**W** – Resistencia a la corrosión atmosférica

**Z** – Símbolos adicionales opcionales

Símbolos adicionales:

**A** – Endurecimiento por precipitación

**C** – Conformado especial en frío

**D** – Galvanizado en caliente

**E** – Esmaltado

**F** – Forjado

**H** – Perfil hueco

**L** – Baja temperatura

**M** – Laminación termomecánica

**N** – Normalizado o Laminado de normalización

**P** – Tablestacas

**Q** – Templado o revenido

**S** – Construcción naval

**T** – Tubos

## 1.2. Designación numérica UNE-EN 10027-2:2016

La designación numérica se compone de tres partes: la primera de un dígito que indica el grupo del material del que se trata (1 para los aceros), la segunda de dos dígitos indica el subgrupo del material y la tercera parte compuesta por cuatro dígitos que determinan el número del orden:

**1 XX YYYY**

**XX** – sub grupos:

Aceros no aleados:

00 y 90 aceros de base

1-7 y 91-97 aceros de calidad

11-19 aceros especiales

Aceros aleados:

8-9 y 98-99 aceros de calidad

20-29 aceros para herramientas

30-39 aceros de grupos diversos

40-49 aceros inoxidables y refractarios

50-89 aceros estructurales

## 2. Nomenclatura internacional

La conversión entre las normas más utilizadas es la mostrada en la **Tabla A2.1**.

EN 10025-5:2004 [Simbólica]	EN 10025-5:2004 [Numérica]	EN 10155:1993 [Simbólica]	EN 10155:1993 [Numérica]	DIN 17119:1984 (Alemania)	Euronorma EU 155-80	UNE 36042:1984	NFA 35 502:1984 (Francia)	BS 4360:1990 (Reino Unido)	A.H.V	ASTM
S235J0W	18958	S235J0W	18958		Fe 360 C KI	AE 235 WC	E 24W 3			
S235J2W	18961	S235J2W	18961	W St 37-3	Fe 360 D KI	AE 235 WD	E 24W4			
S355J0WP	18945	S355J0WP	18945		Fe 510 C 1 KI	AE 355 W1C	E 36WA 3	WR 50A		
S355J2WP	18.959	S355J2WP	18.959		Fe 510 D 1 KI	AE 355 W1D	E 36WA 4		CT-36-A	A-242-75
S355J0W	18963	S355J0W	18963		Fe 510 C 2 KI	AE 355 W2C	E 36W B 3	WR 50B		
S355J2W	18.965	S355J2G2W	18.965	W St 52-3		AE 355 W2D	E 36W B 4	WR 50C	CT-36-B	A-588-B
S355J2W+N		S355J2G1W	18.963		Fe 510 D 2 KI	AE 355 W3D	E 36W B 4			
S355K2W	18967	S355J2G2W	18967							
S355K2W+N		S355J2G1W	18966							

**Tabla A2.1.** Tabla de conversión entre normas.

## 3. Composición química

Los porcentajes máximos y mínimos de los elementos presentes en las aleaciones de acero corten aparecen listados en la **Tabla A3.1**. en comparación a los presentes en los aceros no aleados que aparecen en la **Tabla A3.2**.



Designación	Estado de desoxidación	C % máx.	Si % máx.	Mn %	P % b	S % máx. b	N % máx.	Adición de elementos fijadores del N c	Cr %	Cu %	Otros
Según EN 10027-1 y CR 10260											
Según EN 10027-2											
S235J0W	FN	0,16	0,45	0,15 – 0,70	máx. 0,040	0,040	0,010 <sup>d g</sup>	–	0,35 – 0,85	0,20 – 0,60	e
S235J2W	FF					0,035	–	sí			
S355J0WP	FN			máx. 1,1	0,05 – 0,16	0,040	0,010 <sup>g</sup>	–	0,25 – 1,35	0,20 – 0,60	e
S355J2WP	FF	0,15	0,80			0,035	–	sí			
S355J0W	FN				máx. 0,040	0,040	0,010 <sup>d g</sup>	–			
S355J2W	FF	0,19	0,55	0,45 – 1,60	máx. 0,035	0,035	–	sí	0,35 – 0,85	0,20 – 0,60	e f
S355K2W	FF				máx. 0,035	0,035	–	sí			

<sup>a</sup> FN = acero efervescente no permitido, FF = acero totalmente calmado (véase el apartado 6.2.2).  
<sup>b</sup> Para productos largos el contenido de P y S puede ser un 0,005% superior.  
<sup>c</sup> Los aceros deben contener por lo menos uno de los siguientes elementos: Al total  $\geq 0,020\%$ ; Nb: 0,010% – 0,065%; V: 0,01% – 0,14%; Ti: 0,01% – 0,12%. Si estos elementos se utilizan combinados, al menos uno de ellos debe estar presente en la cantidad mínima indicada.  
<sup>d</sup> Se permite sobrepasar los valores especificados a condición de que para cada incremento del 0,001% de N, el contenido máximo de P se reduzca en 0,005%; en cualquier caso, la cantidad de N del análisis de colada no debe superar 0,013%.  
<sup>e</sup> Los aceros pueden presentar un contenido máximo de Ni de 0,70%.  
<sup>f</sup> Los aceros pueden presentar un contenido máximo de Mo de 0,35% y de Zr de 0,17%.  
<sup>g</sup> El contenido máximo de nitrógeno no se aplica si el contenido en Al total es como mínimo de 0,020% o cuando hay otros fijadores del N en cantidad suficiente. En ese caso, los fijadores del N deben indicarse en el documento de inspección.

Tabla A3.1. Porcentajes en masa de cada elemento en aceros patinables

Designación	Estado de desoxidación <sup>b</sup>	C en % máx. para espesor nominal del producto en mm		Si % máx.	Mn % máx.	P % máx. <sup>d</sup>	S % máx. <sup>d, e</sup>	N % máx. <sup>f</sup>	Cu % máx. <sup>g</sup>	Otro % máx. <sup>h</sup>
		≤ 16	> 16 ≤ 40							
Según las Normas EN 10027-1 y CR 10260	Según la Norma EN 10027-2									
S235JR	FN	0,17	0,17	0,20	1,40	0,035	0,035	0,012	0,55	—
S235J0	FN	0,17	0,17	0,17	1,40	0,030	0,030	0,012	0,55	—
S235J2	FF	0,17	0,17	0,17	1,40	0,025	0,025	—	0,55	—
S275JR	FN	0,21	0,21	0,22	1,50	0,035	0,035	0,012	0,55	—
S275J0	FN	0,18	0,18	0,18 <sup>i</sup>	1,50	0,030	0,030	0,012	0,55	—
S275J2	FF	0,18	0,18	0,18 <sup>j</sup>	1,50	0,025	0,025	—	0,55	—
S355JR	FN	0,24	0,24	0,24	1,60	0,035	0,035	0,012	0,55	—
S355J0	FN	0,20 <sup>k</sup>	0,20 <sup>k</sup>	0,22	1,60	0,030	0,030	0,012	0,55	—
S355J2	FF	0,20 <sup>k</sup>	0,20 <sup>k</sup>	0,22	1,60	0,025	0,025	—	0,55	—
S355K2	FF	0,20 <sup>k</sup>	0,20 <sup>k</sup>	0,22	1,60	0,025	0,025	—	0,55	—
S450J0 <sup>l</sup>	FF	0,20	0,20 <sup>k</sup>	0,22	1,70	0,030	0,030	0,025	0,55	m

<sup>a</sup> Véase el apartado 7.2.  
<sup>b</sup> FN = acero efervescente no permitido; FF= acero totalmente calmado (véase el apartado 6.2.2).  
<sup>c</sup> Para perfiles con espesor nominal > 100 mm el contenido de C por acuerdo.  
Véase la opción 26.  
<sup>d</sup> Para productos largos el contenido en P y S puede ser un 0,005% superior.  
<sup>e</sup> En los productos largos, para mejorar la aptitud al mecanizado, el contenido máximo en S puede aumentarse en 0,015% por acuerdo siempre que el acero sea tratado para modificar la morfología de los sulfuros y la composición química contenga un 0,0020% de Ca como mínimo.  
Véase la opción 27.  
<sup>f</sup> El valor máximo para el nitrógeno no aplica si el contenido mínimo de Al total es de 0,020% o el contenido mínimo de Al soluble en ácido es de 0,015%. Tampoco aplica si están presentes otros fijadores del N en cantidad suficiente. En este caso, los fijadores del N deben mencionarse en el documento de inspección.  
<sup>g</sup> Un contenido de Cu por encima de 0,40% puede causar fragilidad durante el conformado en caliente.  
<sup>h</sup> Si se añaden otros elementos, deben mencionarse en el documento de inspección.  
<sup>i</sup> Para espesor nominal > 150 mm: C = 0,20% máx.  
<sup>j</sup> Para grados suministrados para conformado con rodillos en frío (véase el apartado 7.4.2.2.3): C = 0,22% máx.  
<sup>k</sup> Para espesor nominal > 30 mm: C = 0,22% máx.  
<sup>l</sup> Sólo aplicable para productos largos.  
<sup>m</sup> El acero puede contener como máximo: 0,05% de Nb, 0,13% de V y 0,05% de Ti.

Tabla A3.2. Porcentajes en masa de cada elemento en aceros no aleados

En la Tabla A3.3. se muestra un resumen de las tablas anteriores.

	patinable	no aleado
C (%)	≤ [0,12 - 0,16]	≤ [0,17 - 0,24]
Mn (%)	≤ [0,20 - 1,50]	≤ [1,40 - 1,70]
P (%)	≤ [0,035 - 0,150]	≤ [0,025 - 0,035]
S (%)	≤ [0,030 - 0,035]	≤ [0,025 - 0,035]
Si (%)	≤ [0,40 - 0,75]	≤ 0,55
Cu (%)	≤ [0,25 - 0,55]	≤ 0,55
Cr (%)	≤ [0,30 - 1,25]	-
Ni (%)	≤ 0,65	-
Mo (%)	≤ 0,30	-
N (%)	≤ 0,009	≤ 0,025

Tabla A3.3. Resumen de porcentajes máximos y mínimos en masa de cada elemento en aceros patinables y no aleados.

## 4. Características mecánicas

Las propiedades mecánicas de los principales aceros corten vienen especificadas en las tablas **Tabla A4.1.** y **Tabla A4.3** en comparación a las propiedades de los aceros no aleados presentes en las tablas **Tabla A4.2.** y **Tabla A4.4.**

Designación	Mínimo límite elástico $R_{el}^a$ MPa <sup>b</sup>							Resistencia a la tracción $R_m^a$ MPa <sup>b</sup>		Orientación de las probetas <sup>a</sup>	Porcentaje mínimo de alargamiento en la rotura <sup>a</sup> %								
	Espesor nominal mm							Espesor nominal mm			$L_0 = 80$ mm Espesor nominal mm $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$ Espesor nominal mm								
	Según EN 10027-1 y CR 10260	Según EN 10027-2	$\leq 16$	$> 16$ $\leq 40$	$> 40$ $\leq 63$	$> 63$ $\leq 80$	$> 80$ $\leq 100$	$> 100$ $\leq 150$	$< 3$		$\geq 3$ $\leq 100$	$> 100$ $\leq 150$	$> 1,5$ $\leq 2$	$> 2$ $\leq 2,5$	$> 2,5$ $< 3$	$\geq 3$ $\leq 40$	$> 40$ $\leq 63$	$> 63$ $\leq 100$	$> 100$ $\leq 150$
S235J0W	1.8958		235	225	215	215	215	195	360 a 510	360 a 510	350 a 500	l	19	20	21	26	25	24	22
S235J2W	1.8961								360 a 510			t	17	18	19	24	23	22	22
S355J0WP	1.8945		355	345 <sup>c</sup>	-	-	-	-	510 a 680	470 a 630 <sup>c</sup>	-	l	16	17	18	22 <sup>c</sup>	-	-	-
S355J2WP	1.8946											t	14	15	16	20	-	-	-
S355J0W	1.8959											l	16	17	18	22	21	20	18
S355J2W	1.8965								510 a 680	470 a 630	450 a 600	t	14	15	16	20	19	18	18
S355K2W	1.8967											t	14	15	16	20	19	18	18

<sup>a</sup> Para chapas, bandas y planos anchos con anchura  $\geq 600$  mm se aplica la dirección transversal (t) a la de laminación. Para los demás productos los valores aplican a la dirección paralela (l) a la de laminación.

<sup>b</sup> 1 MPa = 1 N/mm<sup>2</sup>.

<sup>c</sup> - Para los productos planos: aplicable hasta 12 mm.  
- Para productos largos: aplicable hasta 40 mm.

<sup>a</sup> Para chapas, bandas y planos anchos con anchura  $\geq 600$  mm se aplica la dirección transversal (t) a la de laminación. Para los demás productos los valores aplican a la dirección paralela (l) a la de laminación.

<sup>b</sup> 1 MPa = 1 N/mm<sup>2</sup>.

<sup>c</sup> - Para los productos planos: aplicable hasta 12 mm.

- Para productos largos: aplicable hasta 40 mm.

**Tabla A4.1.** Propiedades mecánicas de los aceros patinables.

Designación		Límite elástico mínimo ReH <sup>a</sup> MPa <sup>b</sup>										Resistencia a la tracción R <sub>m</sub> <sup>a</sup> MPa <sup>b</sup>					
Según las Normas EN 10027-1 y CR 10260	Según la Norma EN 10027-2	Espesor nominal mm										Espesor nominal mm					
		≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250	> 250 ≤ 400 <sup>c</sup>	> 400 <sup>c</sup>	< 3	≥ 3 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 250	> 250 ≤ 400 <sup>c</sup>	
S235JR	1.0038	235	225	215	215	215	195	185	175	—	—	360 a 510	360 a 510	350 a 500	340 a 490	—	—
S235J0	1.0114	235	225	215	215	215	195	185	175	—	—	360 a 510	360 a 510	350 a 500	340 a 490	—	—
S235J2	1.0117	235	225	215	215	215	195	185	175	165	165	360 a 510	360 a 510	350 a 500	340 a 490	330 a 480	—
S275JR	1.0044	275	265	255	245	235	225	215	205	—	—	430 a 580	410 a 560	400 a 540	380 a 540	—	—
S275J0	1.0143	275	265	255	245	235	225	215	205	—	—	430 a 580	410 a 560	400 a 540	380 a 540	—	—
S275J2	1.0145	275	265	255	245	235	225	215	205	195	195	430 a 580	410 a 560	400 a 540	380 a 540	380 a 540	—
S355JR	1.0045	355	345	335	325	315	295	285	275	—	—	510 a 680	470 a 630	450 a 600	450 a 600	—	—
S355J0	1.0553	355	345	335	325	315	295	285	275	—	—	510 a 680	470 a 630	450 a 600	450 a 600	—	—
S355J2	1.0577	355	345	335	325	315	295	285	275	265	265	510 a 680	470 a 630	450 a 600	450 a 600	450 a 600	—
S355K2	1.0596	355	345	335	325	315	295	285	275	265	265	510 a 680	470 a 630	450 a 600	450 a 600	450 a 600	—
S450J0 <sup>d</sup>	1.0590	450	430	410	390	380	380	—	—	—	—	—	550 a 720	530 a 700	—	—	—

<sup>a</sup> Para chapas, bandas y planos anchos con anchura  $\geq 600$  mm, los valores se aplican a la dirección transversal (t) a la de laminación. Para los demás productos, los valores se aplican a la dirección paralela (l) a la de laminación.

<sup>b</sup> 1 MPa = 1 N/mm<sup>2</sup>.

<sup>c</sup> Los valores aplican para los productos planos.

<sup>d</sup> Aplicable sólo a los productos largos.

Tabla A4.2. Propiedades mecánicas de los aceros no aleados.

Designación		Temperatura	Mínima energía <sup>a</sup>
Según EN 10027-1 y CR 10260	Según EN 10027-2	°C	J
S235J0W	1.8958	0	27
S235J2W	1.8961	- 20	27
S355J0WP <sup>b</sup>	1.8945	0	27
S355J2WP <sup>b</sup>	1.8946	- 20	27
S355J0W	1.8959	0	27
S355J2W	1.8965	- 20	27
S355K2W	1.8967	- 20	40 <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Para espesores nominales ≤ 12 mm véase el apartado 7.3.2.1 de la Norma Europea EN 10025-1:2004.

<sup>b</sup> En el momento de hacer el pedido se debe acordar la verificación de los valores de energía de rotura de flexión por choque. Véase la opción 3.

<sup>d</sup> Este valor corresponde con 27 J a -30 °C (véase el Eurocódigo 3).

**Tabla A4.3.** Propiedades mecánicas de los aceros patinables.

Designación		Temperatura °C	Energía mínima (J) Espesor nominal en mm		
Según las Normas EN 10027-1 y CR 10260	Según la Norma EN 10027-2		≤ 150 <sub>a b</sub>	> 150 ≤ 250 <sub>b</sub>	> 250 ≤ 400 <sub>c</sub>
S235JR	1.0038	20	27	27	—
S235J0	1.0114	0	27	27	—
S235J2	1.0117	- 20	27	27	27
S275JR	1.0044	20	27	27	—
S275J0	1.0143	0	27	27	—
S275J2	1.0145	- 20	27	27	27
S355JR	1.0045	20	27	27	—
S355J0	1.0553	0	27	27	—
S355J2	1.0577	- 20	27	27	27
S355K2	1.0596	- 20	40 <sup>d</sup>	33	33
S450J0 <sup>e</sup>	1.0590	0	27	—	—

<sup>a</sup> Para espesores nominales ≤ 12 mm véase el apartado 7.3.2.1 de la Norma Europea EN 10025-1:2004.

<sup>b</sup> Para perfiles con un espesor nominal > 100 mm el valor debe ser acordado.  
Véase la opción 28.

<sup>c</sup> Valores aplicables a productos planos.

<sup>d</sup> Este valor corresponde con 27 J a -30 °C (véase el Eurocódigo 3).

<sup>e</sup> Aplicable únicamente para productos largos.

**Tabla A4.4.** Propiedades mecánicas de los aceros no aleados.

## 5. Carácter protector de la herrumbre

La capa de herrumbre protectora se compone de muchos productos de corrosión, la gran mayoría de la misma composición química, pero con distinta fase o estructura cristalina, tal y como se muestra en las tablas **Tabla A5.1.**, **Tabla A5.2.**, **Tabla A5.3.** y **Figura A5.4.**

	Productos de corrosión	Fórmula	Estructura cristalina
Oxihidróxidos	Goetita	$\alpha$ -FeOOH	Ortorrómica
	Akaganeita	$\beta$ -FeOOH	Tetragonal
	Lepidocrocita	$\gamma$ -FeOOH	Ortorrómica
	Feroxihiita	$\delta'$ -FeOOH	Hexagonal de corto alcance
Óxidos	Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Cúbica
	Maghemita	$\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cúbica
	Hematita	$\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Hexagonal

**Tabla A5.1.** Productos de corrosión del hierro y sus estructuras.

Productos de la corrosión	Morfología	Distribución dentro de la capa de herrumbre	Estabilidad
<b>Lepidocrocita</b>	Presenta formas muy arenosas del tipo "fluorescencias laminares" [31], en forma de regiones achatadas. Puede también estar en forma de estructuras fibrosas o micáceas, diamantes y cúbicas. Los cristales presentan tamaños de 0,5 a 1,0 $\mu$ m, largo de 0,1 a 0,2 $\mu$ m y espesor < 0,1 $\mu$ m.	Se encuentra en la capa externa	Presenta una cinética de reacción rápida. Se forma en medios aireados. Es el primer óxido a formarse en las atmósferas rural, industrial y marina. La lepidocrocita envejecida se puede transformar en goethita. Por el calentamiento seco, puede transformarse en maghemita y después en hematita.
<b>Goethita</b>	Presenta varias formas y una amplia distribución de tamaño de partículas desde tamaños nanométricos. Generalmente, se forma en agregados cristalinos densos. La goethita semicristalina está asociada con formaciones globulares del tipo "bolas de algodón", que son estructuras más cerradas [29]. La goethita cristalina está asociada con estructuras aciculares, que en un tipo de estructura más irregular y abierta, presenta tamaños que varían de una centena de nm a varias $\mu$ m. Los cristales macroscópicos de goethita natural pueden tener aun varios mm en longitud. Otras formas posibles son cubos, bipirámides y bastones duplos.	La goethita es formada preferencialmente en la capa interna de los aceros.	Es uno de los óxidos más estables a temperatura ambiente. Predomina principalmente, en ambientes tropicales y con un contenido significativo de SO <sub>2</sub> . Al aumentar la concentración de SO <sub>2</sub> en la atmósfera aumenta la relación goethita / lepidocrocita en la capa de herrumbre interna. Es el producto final del envejecimiento de otros óxidos de hierro. Por el calentamiento seco, se puede transformar en hematita. Puede presentarse también como goethita superparamagnética.
<b>Magnetita</b>	En la forma de productos coniformes o partículas brillantes de forma poligonal (octaedros y dodecaedros rómbicos). Otras formas posibles son esferas y cubos.	Está localizada en la capa interna, cerca del sustrato, en forma de pequeñas islas.	Es un producto típico de atmósferas marinas. Se forma debido al acceso restringido de oxígeno y su presencia está asociada con una baja eficiencia protectora de la capa de herrumbre, ya que es un óxido conductor. Es más estable en ambientes alcalinos sobre condiciones reductoras.

**Tabla A5.2.** Descripción de los productos de corrosión del hierro.

Productos de la corrosión	Morfología	Distribución dentro de la capa de herrumbre	Estabilidad
<b>Maghemita</b>	Usualmente es formada por la transformación del estado sólido, a partir de otros óxidos de hierro y, casi siempre adopta la forma de su precursor. Las formas más comunes son cubos, placas y agujas.	Igual a la magnetita. Está localizada en la capa interna del sustrato en forma de pequeñas islas.	Producto típico de atmósferas marinas. Es isoestructural con la magnetita. Puede formarse por la oxidación de magnetita, deshidratación de lepidocrocita o por calentamiento de otros óxidos de hierro. Presenta estructura espinela, la cual es poco encontrada en la naturaleza
<b>Akaganeita</b>	Presenta dos morfologías básicas: agujas y balones. Sus cristales, raramente, son mayores de 500 nm. Ambas formas presentan una distribución pequeña de tamaños de partículas.	Generalmente está localizada en la capa externa de los productos de corrosión.	Es un producto típico de atmósferas marinas. Se forma en presencia de haluros ( $\text{Cl}^-$ e $\text{F}^-$ ), con baja estabilidad, sólo es estable en pH bajos. Se transforma en goethita o magnetita a valores de pH elevados [36]. Raramente es encontrada como mineral. La descomposición a seco de ella comienza a $150^\circ\text{C}$ , convirtiéndose completamente en hematita.
<b>Feroxita</b>	Generalmente se encuentra en forma de partículas pequeñas y de poca cristalinidad. La estructura básica es similar a la de la hematita. Está asociada con formaciones del tipo "flor" [37,38]. Presenta estructuras aciculares, esféricas o hexagonales [34]. Generalmente es encontrada con sus dos formas polimorfas, goethita y lepidocrocita.	Está localizada en la capa interna de los aceros patinables de manera homogénea [34, 39, 40]. En el acero al carbono se presenta como una estructura heterogénea y quebradiza.	Existen dos formas: $\delta\text{-FeOOH}$ que es natural e $\delta\text{-FeOOH}$ que es sintética. $\delta\text{-FeOOH}$ es inestable y se transforma en goethita [33]. Si la deshidratación toma lugar en estado seco a $500^\circ\text{C}$ , su producto final es hematita.
<b>Hematita</b>	Las formas más comunes son rombos, placas hexagonales. Cuando ella es sintética puede adoptar varias formas (placas, balones, agujas, esferas, elipsoides, estrellas, cubos)	Generalmente está localizada en la capa externa de los aceros	Es el óxido más estable. Es estable en una franja grande de pH bajo condiciones oxidantes [31]

**Tabla A5.2.** Descripción de los productos de corrosión del hierro.



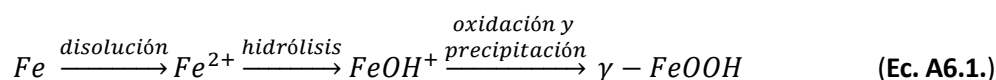
**Tabla A5.3.** Color de los productos de corrosión.



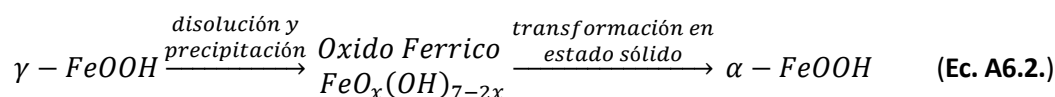
De entre ellos los mayoritarios, y a los que se les atribuyen las principales características anticorrosivas, son los productos de corrosión conocidos como: lepidocrocita ( $\gamma$ -FeOOH) capa externa y goetita ( $\alpha$ -FeOOH) en la capa interna.

## 6. Mecanismos de formación de las herrumbres protectoras

La creación de esta capa pasivada empieza con la oxidación de la capa superficial del acero con la humedad superficial del metal.

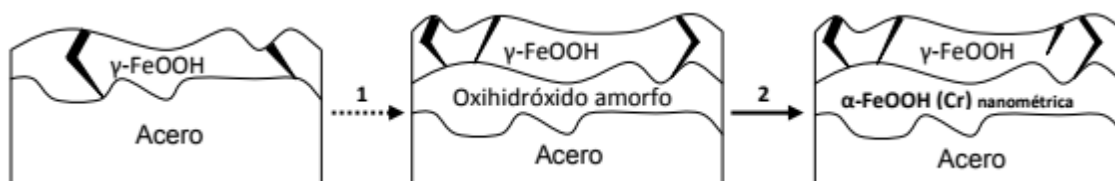


Posteriormente una vez creada esta capa compacta que tan buenas propiedades anticorrosivas proporciona se crea una segunda fase de hidróxido amorfo que con el paso del tiempo (aproximadamente una década) se va convirtiendo en un  $\alpha$ -FeOOH enriquecido en Cr.



Este oxido se encuentra densamente empaquetado, proporcionando estabilidad tanto electroquímica como termodinámicamente.

En la **Figura A6.1.** podemos ver como se forma la herrumbre paso a paso.



**Figura A6.1.** Formación de la herrumbre protectora.

## 7. Probetas utilizadas durante los ensayos

Las imágenes tomadas a las probetas antes de la realización de los ensayos son las que se presentan en la **Figura A7.1.**, **Figura A7.2.** y **Figura A7.3.** para la columna C y en la **Figura A7.4.**, **Figura A7.5.** y **Figura A7.6.** para la columna F.



**Figura A.7.1.** Probetas 1, 2 y 3 de acero corten.



**Figura A.7.2.** Probetas 4, 5 y 6 de acero corten.



**Figura A.7.3.** Probetas 7, 8 y 9 de acero corten.



**Figura A.7.4.** Probetas 11, 12 y 13 de acero corten.



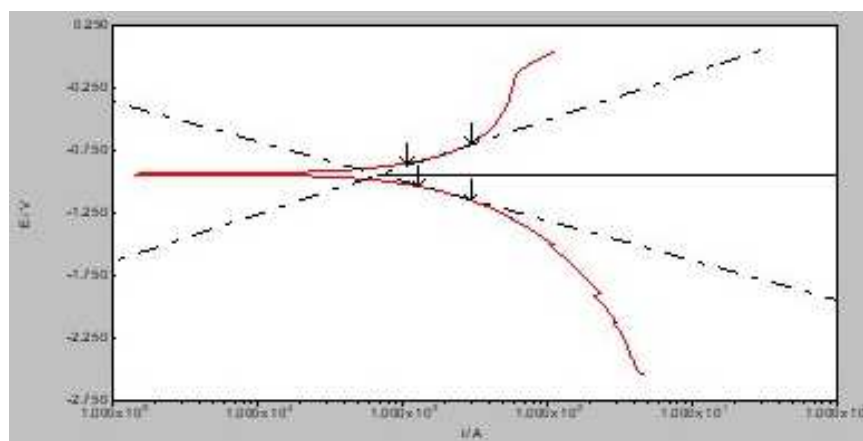
**Figura A.7.5.** Probetas 14, 15 y 16 de acero corten.



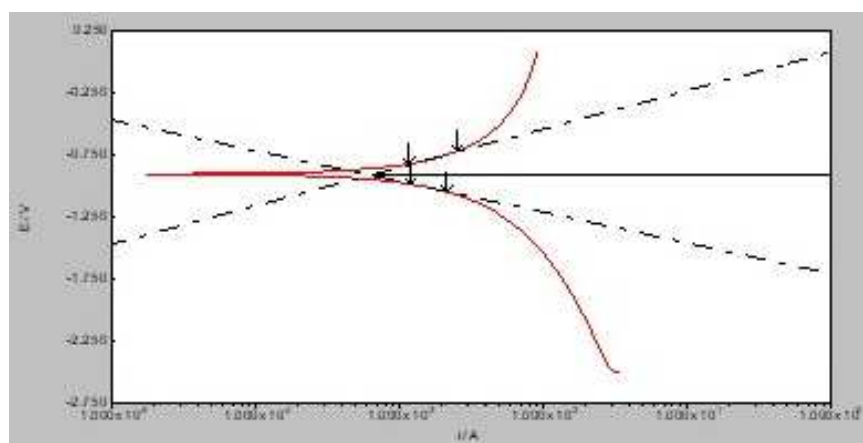
**Figura A.7.6.** Probetas 17, 18 y 19 de acero corten.

## 8. Resultados de los ensayos Tafel.

Las gráficas obtenidas de los ensayos Tafel son las que aparecen en la **Figura A8.1**, **Figura A8.2**, **Figura A8.3**, **Figura A8.4**, **Figura A8.5**, **Figura A8.6** y **Figura A8.7** para la columna C y en la **Figura A8.8**, **Figura A8.9**, **Figura A8.10**, **Figura A8.11**, **Figura A8.12**, **Figura A8.13** y **Figura A8.14** para la columna F.

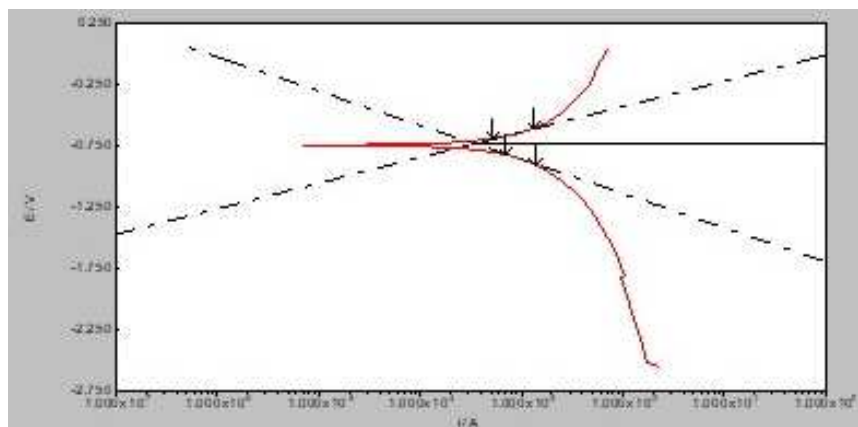


**Figura A8.1.** Gráfica del ensayo Tafel de la probeta 1.

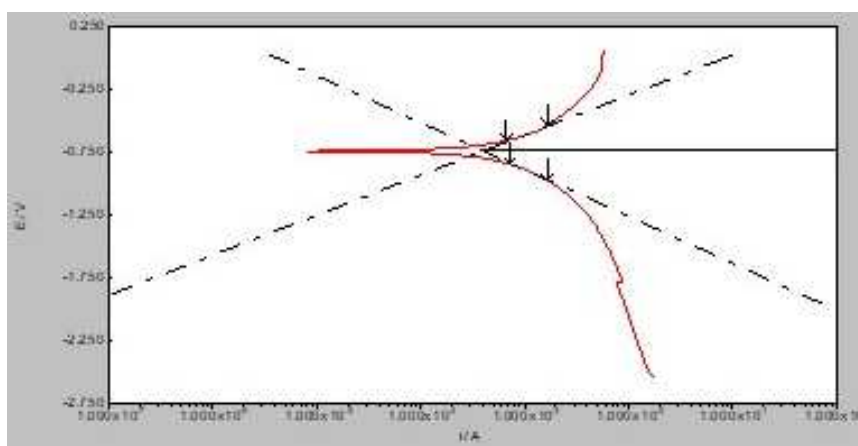


**Figura A8.2.** Gráfica del ensayo Tafel de la probeta 2.

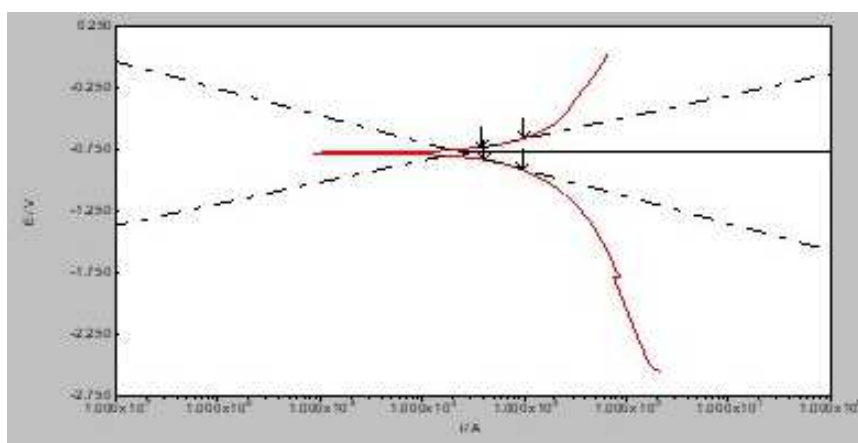




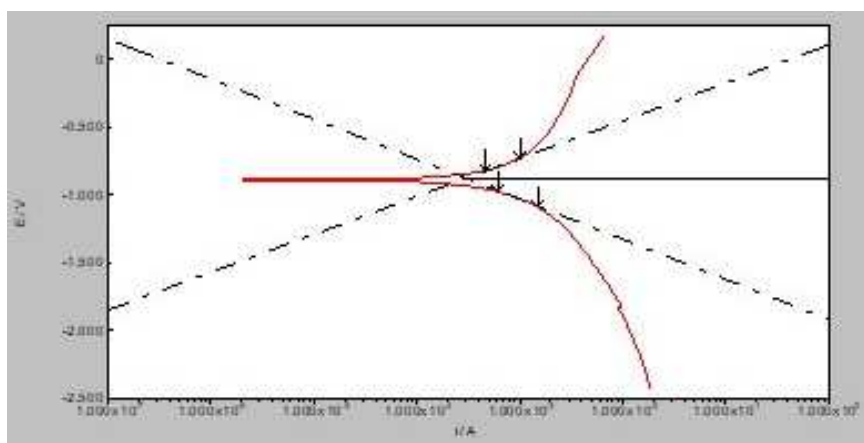
**Figura A8.3.** Grafica del ensayo Tafel de la probeta 4.



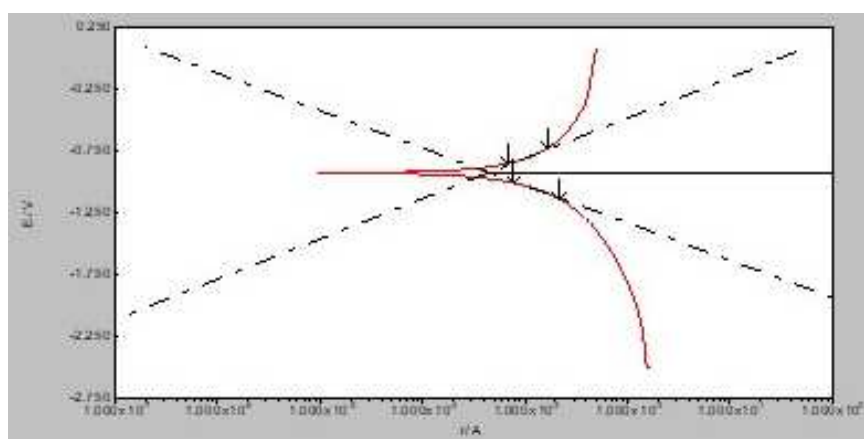
**Figura A8.4.** Grafica del ensayo Tafel de la probeta 5.



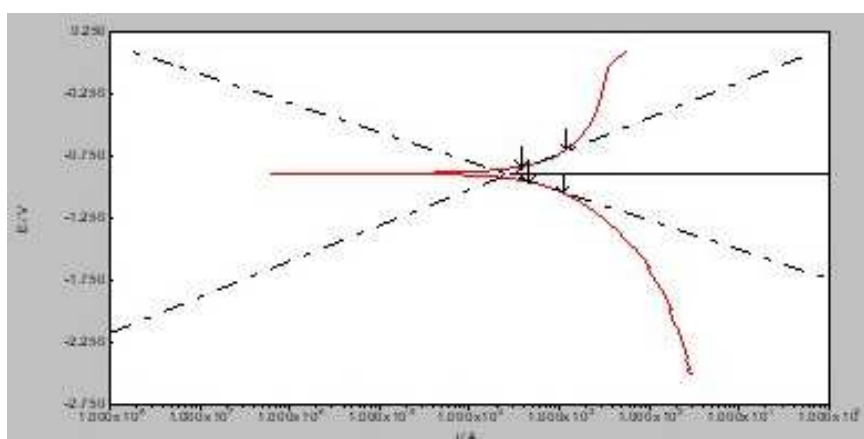
**Figura A8.5.** Grafica del ensayo Tafel de la probeta 6.



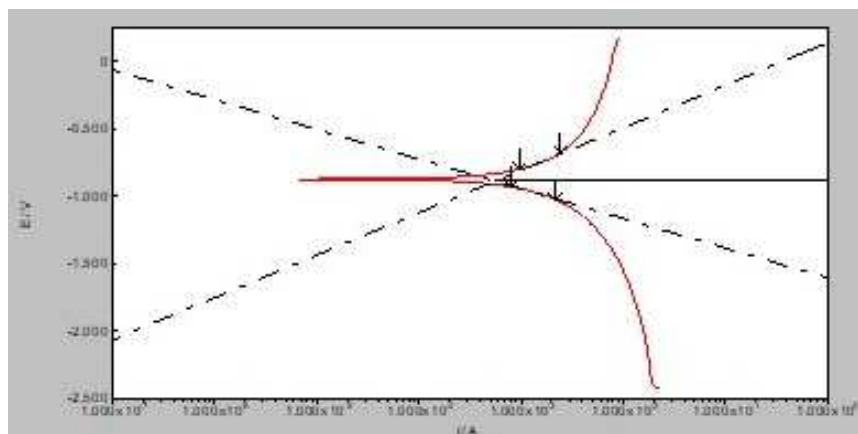
**Figura A8.6.** Grafica del ensayo Tafel de la probeta 7.



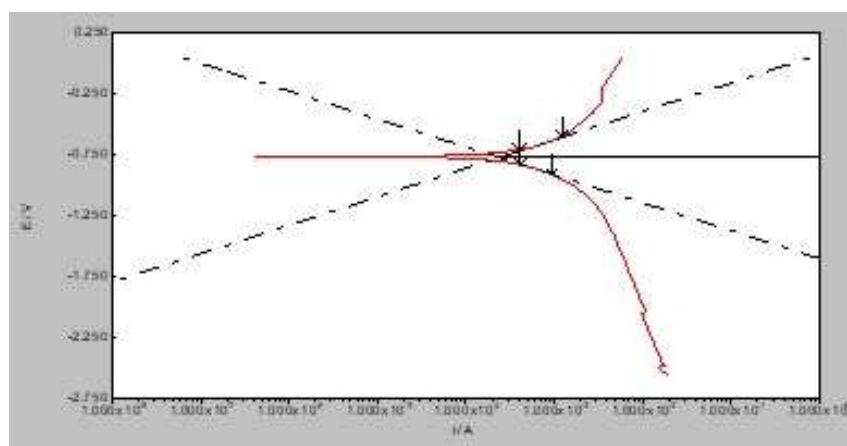
**Figura A8.7.** Grafica del ensayo Tafel de la probeta 9.



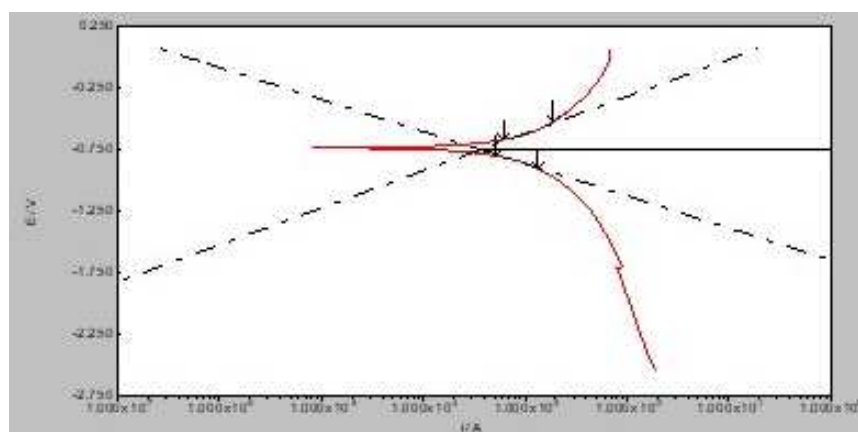
**Figura A8.8.** Grafica del ensayo Tafel de la probeta 11.



**Figura A8.9.** Grafica del ensayo Tafel de la probeta 12.

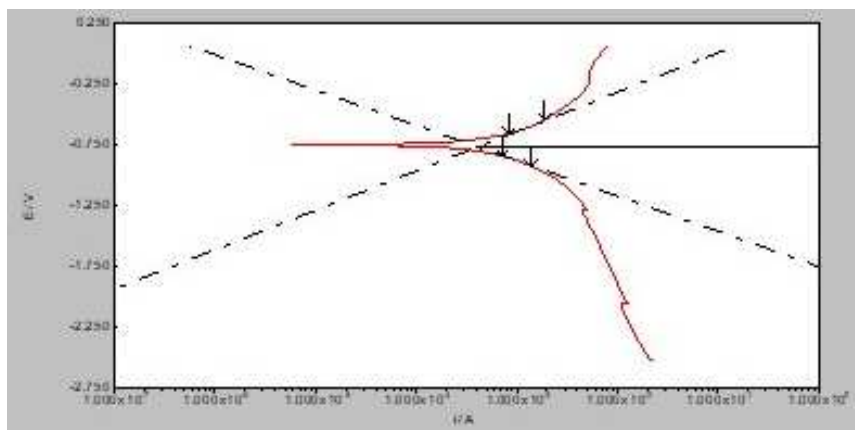


**Figura A8.10.** Grafica del ensayo Tafel de la probeta 14.

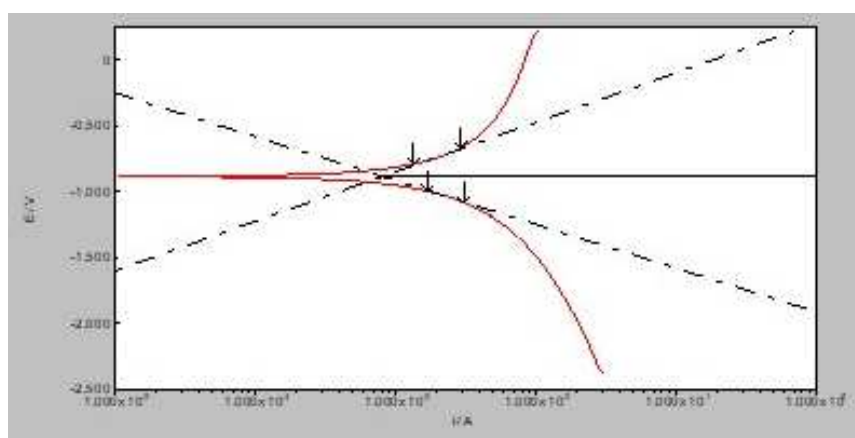


**Figura A8.11.** Grafica del ensayo Tafel de la probeta 15.

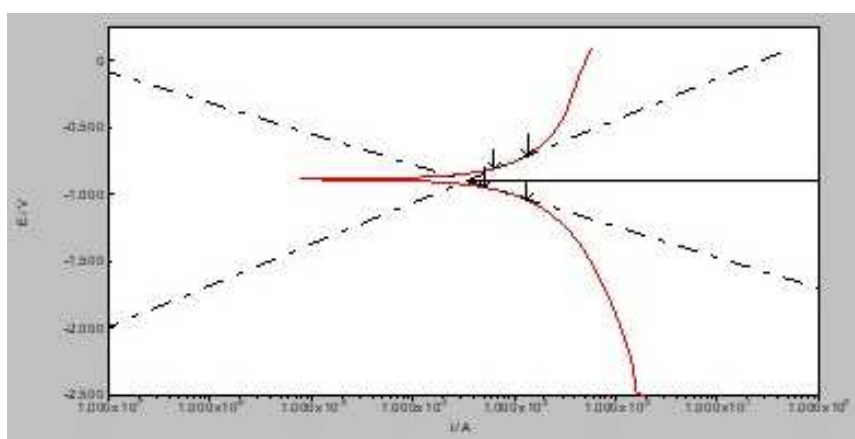




**Figura A8.12.** Grafica del ensayo Tafel de la probeta 16.



**Figura A8.13.** Grafica del ensayo Tafel de la probeta 17.



**Figura A8.14.** Grafica del ensayo Tafel de la probeta 19.

## ANEXO B

### Fundición de Hierro

#### 1. Nomenclatura europea de las fundiciones de hierro

Las normas de nomenclatura europea vienen recogidas en la norma UNE-EN 1560:2011<sup>[20]</sup> (Designación simbólica y numérica).

##### 1.1. Designación Simbólica UNE-EN 1560:2011

Se empieza especificando que se trata de un material normalizado por la norma UNE-EN con las letras EN, seguidas de las dos letras que indican de qué clase de fundición se trata. A continuación, se utiliza una letra para seleccionar la estructura gráfica y otra más para especificar la estructura de la matriz (en caso de solo haber una letra esta especificara la estructura gráfica). Después se da de una a cuatro letras y los números que sean necesarios para determinar el método de clasificación, así como la característica mecánica. Por último, se puede añadir una última letra a modo de requisitos adicionales.

**EN – GJ X1 X2 YYY ZZZ**

**G** – Fundición

**J** – Hierro

**X1** – Estructura gráfica:

L – Laminar

S – Esferoidal

M – Carbono recocido / Maleable

V – Vermicular

N – Libre de grafito / Ledeburítica

Y – Especial

**X2** – Estructura de la matriz:

A – Austenita

R – Ausferrita

F – Ferrita

P – Perlita

M – Martensita

L – Ledeburita

Q – Templada



T – Bonificada (templada y revenida)

B – Corazón negro

W – Corazón blanco

**YYY** – Método de clasificación:

Resistencia a la tracción (Mpa)

Dureza (empieza con las letras de la escala):

HB – Brinell

HV – Vickers

HR – Rockwell

Composición química:

N – Símbolos adicionales opcionales

D – Piezas en bruto de fundición

H – Piezas tratadas térmicamente

W – Piezas aptas para soldadura

Z – Requisitos adicionales

## 1.2. Designación numérica UNE-EN 1560:2011

La designación numérica se compone de cuatro partes: la primera de un dígito que indica el grupo de materiales del que se trata (5 para fundición de hierro), la segunda de un dígito indica la estructura del grafito, la tercera indica la estructura de la matriz y la última parte compuesta de dos dígitos que determinan el número del orden:

### 5 . X Y Z Z

**X** – Estructura grafitica:

1 – Laminar

2 – Vermicular

3 – Esferoidal

4 – Carbono recocido / Maleable

5 – Libre de grafito / Ledeburítica

9 – Especial

**Y** – Estructura de la matriz:

1 – Ferrita

2 – Ferrita/Perlita

3 – Perlita

4 – Ausferrita

5 – Austenita

6 – Ledeburita

9 – Templada

## 2. Nomenclatura internacional

La conversión entre las normas más utilizadas son las mostradas en **Tabla B2.1.**, **Tabla B2.2.**, **Tabla B2.3.** y **Tabla B2.4.**

EN 1563:1997 [Simbólica]	EN 1563:1997 [Numérica]	BS2789:1973 [UK]	BS2789:1985 [UK]	NBN 830-02:1970 [Bélgica]	DS11 303:1971 [Dinamarca]	NF A32 201:1987 [Francia]	DIN 1693 N:1973 [Alemania]
ENGJS-350 22-LT	EN-JS1015		350/22 L40	FNG 38-17		350-22 L40	GGG-35.3
ENGJS-350 22-RT	EN-JS1014	370/17			0715	350-22	
ENGJS-350-22	EN-JS1010		350/22		0716		
ENGJS-400-18-LT	EN-JS1025		400/18 L20			400-18 L20	GGG-40.3
ENGJS-400-18-RT	EN-JS1024						
ENGJS-400-18	EN-JS1020		400/18	FNG 42-12	0727	400-18	
ENGJS-400-15	EN- JS1030	420/12	420/12			400-15	GGG40
ENGJS-450-10	EN-JS1040		450/10			450-10	
ENGJS-500-7	EN-JS1050	500/7	500/7	FNG 50-7	0707	500-7	GGG50
ENGJS-600-3	EN-JS1060	600/3	600/3	FNG 60-2	0708	600-3	GGG60
ENGJS-700-2	EN- JS1070	700/2	700/2	FNG 70-2		700-2	GGG70
ENGJS-800-2	EN-JS1080	800/2	800/2	FNG 80-2		800-2	GGG80
ENGJS-900-2	EN-JS1090		900/2			900-2	

**Tabla B2.1.** Tabla de conversión entre normas para fundiciones nodulares.

NEN 6002- D:1966 [Países bajos]	UNI 4544:1979 [Italia]	NS 11 301:1990 [Noruega]	SS 14 07:1981 [Suecia]	ASTM A 536:1993 [USA]	USA SAE J434:1986 [USA]	JIS G5502:1995 [Japón]	ISO 1083:1987 [Internaci onal]
GN 38	GS370-17	SjK-350.3	17-15			FCD 350-22 L	350-22
						FCD 350-22	350-22
		SjK-400.3	17-02			FCD 400-18L	400-18L
GN 42				60-40-18		FCD 400-18	400-18
	GS400-12	SjK-400	17-00	65-45-12	D4018#	FCD 400-15	400-15
				70-50-05		FCD 450-10	450-10
GN50	GS500-7	SjK-500	27-02	80-55-06	D4512#	FCD500-7	500-7
GN60	GS600-3	SjK-600	32-03	100-70-03	D5506#	FCD600-3	600-3
GN70	GS700-2	SjK-700	37-01		D7003#	FCD700-2	700-2
	GS800-2	SjK- 800		120-90-02		FCD800-2	800-2
							900-2

**Tabla B2.2.** Tabla de conversión entre normas para fundiciones nodulares.

EN 1561:1997 [Simbólica]	EN 1561:1997 [Numérica]	BS1452:1977 [UK]	BS1452:1990 [UK]	NBN 830-01:1970 [Bélgica]	OS 11 301:1969 [Dinamarca]	NFA 32-101:1987 [Francia]	DIN 1691:1985 [Alemania]	NEN 6002-A:1966 [Países bajos]
ENGJL-100	ENJL 1010		100	FGG10	GG15		GG10	
ENGJL-150	ENJL 1020	150	150	FGG15	GG20	FGL 150	GG15	GG15
ENGJL-20	ENJL 1030	220	200/220	FGG20	GG25	FGL 200	GG20	GG20
ENGJL-250	ENJL1040	260	250	FGG25	GG30	FGL 250	GG25	GG25
ENGJL-300	ENJL1050	300	300	FGG30	GG35	FGL 300	GG30	GG30

**Tabla B2.3.** Tabla de conversión entre normas para fundiciones grises.



UNI 5007:1969 [Italia]	NS11 100:1990 [Noruega]	SS 1401:1984 [Suecia]	ASTM A48-94a:1994 [USA]	ASTM A48M-94:1994 [USA]	JIS G5501:1995 [Japón]	ISO 185:1988 [Internacional]
G10	SjG100	01 10.00	20		FC100	100
G15	SjG150	01 15.00 2	25	150/175	FC150	150
G20	SjG200	01 20.00	30/35	200/225	FC200	200
G25	SjG250	01 25.00	40	250/275	FC250	250
G30	SjG300	01 30.00	45/50	300/325	FC300	300

**Tabla B2.4.** Tabla de conversión entre normas para fundiciones grises.

### 3. Características mecánicas

Las propiedades mecánicas de las fundiciones de hierro gris vienen especificadas en la **Tabla B3.1.**, **Tabla B3.2.**, **Tabla B3.3.** y **Tabla B3.4.** (UNE-EN 1561:2012<sub>[21]</sub>). Las propiedades mecánicas de las fundiciones de hierro nodular están en la **Tabla B3.5.**, **Tabla B3.6.**, **Tabla B3.7.**, **Tabla B3.8.** y **Tabla B3.9.** (UNE-EN 1563:2012<sub>[22]</sub>).

Característica	Símbolo	Unidad SI	Designación del material <sup>a</sup>				Referencias bibliográficas		
			EN-GJL-150 (5.1200)	EN-GJL-200 (5.1300)	EN-GJL-250 (5.1301)	EN-GJL-300 (5.1302)			
			Estructura de la matriz						
			Ferrítica/ Perlítica	Perlítica					
Resistencia a la tracción	$R_m$	MPa	150 a 250	200 a 300	250 a 350	300 a 400	350 a 450	[6]	
Límite elástico convencional al 0,1%	$R_{p0,1}$	MPa	98 a 165	130 a 195	165 a 228	195 a 260	228 a 285		
Alargamiento	$A$	%	0,8 a 0,3	0,8 a 0,3	0,8 a 0,3	0,8 a 0,3	0,8 a 0,3		[7]
Resistencia a la compresión		MPa	$3,40 \times R_m$	$3,18 \times R_m$	$3,01 \times R_m$	$2,87 \times R_m$	$2,75 \times R_m$		[8]
Límite elástico convencional a compresión al 0,1%		MPa	195	260	325	390	455	[6]	
Resistencia a la flexión		MPa	$1,82 \times R_m$	$1,73 \times R_m$	$1,66 \times R_m$	$1,60 \times R_m$	$1,54 \times R_m$	[8]	
Resistencia al cizallamiento		MPa	170	230	290	345	400	[8]	
Resistencia a la torsión		MPa	$1,36 \times R_m$					[8]	
Módulo de elasticidad <sup>b</sup>	$E$	GPa	78 a 103	88 a 113	103 a 118	108 a 137	123 a 143	[9]	
Coefficiente de Poisson	$\nu$	-	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	[7]	
Resistencia a la fatiga por flexión		MPa	$0,46 \times R_m$					[8]	
Límite de fatiga por tracción/compresión alternada		MPa	$0,34 \times R_m$					[8]	
Resistencia a la fatiga por torsión		MPa	$0,38 \times R_m$					[8]	
Tenacidad a la rotura	$K_{Ic}$	MPa.m <sup>1/2</sup>	12	17	20	19	17	[10]	

NOTA 1 MPa equivale a 1 N/mm<sup>2</sup>.

<sup>a</sup> Cuando se precisen requisitos especiales sobre maquinabilidad o características magnéticas, se utiliza el tipo EN-GJL-100 (5.1100). Las características requeridas pueden obtenerse por un tratamiento térmico que modifique la estructura. El tipo EN-GJL-100 (5.1100) no figura en esta tabla.

<sup>b</sup> Depende de la cantidad y de la forma del grafito así como de la carga. La curva tensión-alargamiento de la fundición gris no es lineal. El módulo de elasticidad es la línea tangente en el origen de la curva tensión-alargamiento.

Tabla B3.1. Propiedades mecánicas de las fundiciones grises.

Característica	Símbolo	Unidad SI	Designación del material <sup>a</sup>					Referencias bibliográficas
			EN-GJL-150 (5.1200)	EN-GJL-200 (5.1300)	EN-GJL-250 (5.1301)	EN-GJL-300 (5.1302)	EN-GJL-350 (5.1303)	
Densidad	$\rho$	t/m <sup>3</sup>	7,10	7,15	7,20	7,25	7,30	-
Capacidad calorífica específica entre 20 °C y 200 °C entre 20 °C y 600 °C	$c$	J/(kg · K)	460 535					[11]
Coefficiente de dilatación lineal entre - 100 °C y + 20 °C entre 20 °C y 200 °C entre 20 °C y 400 °C	$\alpha$	µm/(m · K)	10,0 11,7 13,0					[11]
Conductividad térmica a 100 °C a 200 °C a 300 °C a 400 °C a 500 °C	$\lambda$	W/(m · K)	52,5 51,0 50,0 49,0 48,5	50,0 49,0 48,0 47,0 46,0	48,5 47,5 46,5 45,0 44,5	47,5 46,0 45,0 44,0 43,0	45,5 44,5 43,5 42,0 41,5	[11]
Resistividad	$\rho$	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	0,80	0,77	0,73	0,70	0,67	[11]
Coercitividad	$H_0$	A/m	560 a 720					[11] [12]
Permeabilidad máxima	$\mu$	µH/m	220 a 330					[11] [12]
Pérdida por histéresis a B= 1T		J/m <sup>3</sup>	2 500 a 3 000					[11] [12]

<sup>a</sup> Cuando se precisan requisitos especiales sobre maquinabilidad o características magnéticas, se utiliza el tipo EN-GJL-100 (5.1100). Las características requeridas pueden obtenerse por un tratamiento térmico que modifique la estructura. El tipo EN-GJL-100 (5.1100) no figura en esta tabla.

**Tabla B3.2.** Propiedades mecánicas de las fundiciones grises.

Designación del material		Espesor determinante de la pared <i>t</i> mm		Resistencia a la tracción <sup>a</sup> <i>R<sub>m</sub></i> Valores obligatorios sobre muestras MPa mín.
Simbólica	Númerica	>	≤	
EN-GJL-100	5.1100	5	40	<b>100</b>
EN-GJL-150	5.1200	2,5 <sup>b</sup>	50	<b>150</b>
		50	100	130
		100	200	110
EN-GJL-200	5.1300	2,5 <sup>b</sup>	50	<b>200</b>
		50	100	180
		100	200	160
EN-GJL-250	5.1301	5 <sup>b</sup>	50	<b>250</b>
		50	100	220
		100	200	200
EN-GJL-300	5.1302	10 <sup>b</sup>	50	<b>300</b>
		50	100	260
		100	200	240
EN-GJL-350	5.1303	10 <sup>b</sup>	50	<b>350</b>
		50	100	310
		100	200	280

NOTA 1 La designación no depende del tipo de muestra.

NOTA 2 Para una capacidad de amortiguación alta y una conductividad térmica elevada, el material más aconsejable es el EN-GJL-100 (5.1100).

NOTA 3 Los números en negrita indican la resistencia a la tracción mínima que se toma como base para la designación de material. Los valores se relacionan con un diámetro de una muestra en bruto de colada correspondiente al rango aplicable de espesor determinante de pared, conforme a la tabla 3.

NOTA 4 Para espesores determinantes de pared superiores a 200 mm, el fabricante y el comprador deben acordar previamente el tipo y el tamaño de la pieza moldeada y los valores mínimos a obtener.

<sup>a</sup> Si se ha establecido la resistencia a la tracción como propiedad característica, el tipo de muestra se debería establecer también en el pedido (véase el apartado 8.2). Si no se ha establecido en el pedido, el tipo de muestra se deja a criterio del fabricante.

<sup>b</sup> Este valor se incluye como límite inferior del intervalo de espesor determinante de pared.

**Tabla B3.3.** Propiedades mecánicas de las fundiciones grises.

Designación del material		Espesor determinante de pared <i>t</i> mm		Dureza Brinell <sup>a,b</sup> HBW	
Simbólica	Númerica	>	≤	Mín.	Máx.
EN-GJL-HB155	5.1101	2,5 <sup>c</sup>	50	—	<b>155</b>
EN-GJL-HB175	5.1201	2,5 <sup>c</sup>	50	115	<b>175</b>
		50	100	105	165
EN-GJL-HB195	5.1304	5 <sup>c</sup>	50	135	<b>195</b>
		50	100	125	185
EN-GJL-HB215	5.1305	5 <sup>c</sup>	50	155	<b>215</b>
		50	100	145	205
EN-GJL-HB235	5.1306	10 <sup>c</sup>	50	175	<b>235</b>
		50	100	160	220
EN-GJL-HB255	5.1307	20 <sup>c</sup>	50	195	<b>255</b>
		50	100	180	240

NOTA 1 La información sobre la relación entre la dureza Brinell y la resistencia a la tracción se da en el anexo C, y sobre la relación entre la dureza Brinell y el espesor de pared en el anexo E.

NOTA 2 Los números en negrita indican la dureza Brinell máxima que se toma como base para la designación del tipo de material.

<sup>a</sup> Para cada tipo, la dureza Brinell disminuye si aumenta el espesor de pared.

<sup>b</sup> Por acuerdo entre fabricante y comprador, se puede adoptar un intervalo más estrecho de durezas en localizaciones específicas de la pieza, siempre que ésta no sea inferior a 40 HBW. La producción en grandes series puede ser un ejemplo de esta circunstancia.

<sup>c</sup> Este valor está incluido como límite inferior del intervalo de espesor de pared determinante.

**Tabla B3.4.** Propiedades mecánicas de las fundiciones grises.



Característica	Unidad	Designación del material											
		EN-GJS-350-22	EN-GJS-400-18	EN-GJS-450-10	EN-GJS-500-7	EN-GJS-600-3	EN-GJS-700-2	EN-GJS-800-2	EN-GJS-900-2	EN-GJS-1000-18	EN-GJS-1500-14	EN-GJS-2000-10	EN-GJS-2500-10
Resistencia a la cizalladura	MPa	315	360	405	450	540	630	720	810	—	nd <sup>b</sup>	—	—
Resistencia a la torsión	MPa	315	360	405	450	540	630	720	810	—	nd <sup>b</sup>	—	—
Módulo de elasticidad <i>E</i> (tracción y compresión)	GN/m <sup>2</sup>	169	169	169	169	174	176	176	176	170	170	170	170
Coefficiente de Poisson <i>ν</i>	—	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,275	0,28 a 0,29	0,28 a 0,29	0,28 a 0,29	0,28 a 0,29
Límite de fatiga <sup>c</sup> (flexión rotativa) sin entalla <sup>d</sup> (φ 10,6 mm)	MPa	180	195	210	224	248	280	304	304	210	225	275	275
Límite de fatiga <sup>e</sup> (flexión rotativa) con entalla <sup>c</sup> (f 10,6 mm)	MPa	114	122	128	134	149	168	182	182	130	140	165	165
Resistencia a la compresión	MPa	—	700	700	800	870	1 000	1 150	—	—	nd <sup>b</sup>	—	—
Resiliencia a la fractura <sup>g,h,i</sup> <i>K<sub>IC</sub></i>	MPa·√m	90	82	72	63	38	30	30	30	75	72	65	65
Conductividad térmica a 300 °C	W/(K·m)	36,2	36,2	36,2	35,2	32,5	31,1	31,1	31,1	—	—	—	—
Capacidad calorífica específica de 20 °C a 500 °C	J/(kg·K)	515	515	515	515	515	515	515	515	—	—	—	—
Coefficiente de dilatación lineal de 20 °C a 400 °C	μm/(m·K)	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	—	—	—	—
Densidad	kg/dm <sup>3</sup>	7,1	7,1	7,1	7,1	7,2	7,2	7,2	7,2	7,1	7,0	7,0	7,0
Permeabilidad máxima	μH/m	2 136	2 136	2 136	1 596	866	501	501	501	nd <sup>b</sup>	nd <sup>b</sup>	nd <sup>b</sup>	nd <sup>b</sup>
Pérdida por histéresis (B = 1 T)	J/m <sup>3</sup>	600	600	600	1 345	2 248	2 700	2 700	2 700	nd <sup>b</sup>	nd <sup>b</sup>	nd <sup>b</sup>	nd <sup>b</sup>
Resistividad	μΩ·m	0,50	0,50	0,50	0,51	0,53	0,54	0,54	0,54	nd <sup>b</sup>	nd <sup>b</sup>	nd <sup>b</sup>	nd <sup>b</sup>
Estructura de la matriz		ferrita	ferrita	ferrita	ferrita-perlita	ferrita-perlita	perlita	perlita o martensita revenida <sup>f</sup>	perlita o martensita revenida <sup>f</sup>	ferrita	ferrita	ferrita	ferrita

<sup>a</sup> A no ser que se especifique lo contrario, los valores que figuran en esta tabla proceden de mediciones a temperatura ambiente.

<sup>b</sup> No determinado.

<sup>c</sup> Probetas para límite de fatiga según Wöhler.

<sup>d</sup> Sin entalla – En las fundiciones de grafito esferoidal ferríticas recocidas, el límite de fatiga es de aproximadamente el 0,5 × la resistencia a la tracción (en fundiciones de grafito esferoidal con una resistencia a la tracción de 370 MPa). La proporción disminuye cuando aumenta la resistencia a la tracción hasta que, en las fundiciones de grafito esferoidal templadas y revenidas, el límite de fatiga llega aproximadamente a 0,4 × la resistencia a la tracción. La proporción disminuye aún más cuando la resistencia a la tracción supera los 740 MPa. Esta proporción permanece alrededor de 0,45 en los grados ferríticos endurecidos por solución sólida, también con resistencias a la tracción superiores.

<sup>e</sup> Con entalla – En una probeta de 10,6 mm de diámetro en la entalla con una entalla en V circunferencial de 45° y un radio de 0,25 mm, el límite de fatiga de las fundiciones de grafito esferoidal recocidas disminuye a un valor de aproximadamente 0,63 × el límite de fatiga en probetas sin entalla de fundiciones de grafito esferoidal con una resistencia a la tracción de 370 MPa.

<sup>f</sup> Para piezas mayores, también puede ser perlita.

<sup>g</sup> Valores para muestras de fundición de 25 mm; en piezas de paredes más gruesas deberían esperarse valores superiores.

<sup>h</sup> Valores *K<sub>IC</sub>* indicados para coladas en estado bruto de fundición. Las fundiciones de grafito esferoidal ferritizadas por tratamiento térmico presentan menor resiliencia [12].

<sup>i</sup> Los valores *K<sub>IC</sub>* se basan en [12], [15] y [22].

Tabla B3.5. Propiedades mecánicas de las fundiciones nodulares.

Designación del material		Espesor de pared determinante	Límite convencional de elasticidad al 0,2%	Resistencia a la tracción	Alargamiento
Simbólica	Númerica	$t$ mm	$R_{p0,2}$ MPa min.	$R_m$ MPa min.	$A$ % min.
EN-GJS-350-22-LT <sup>a</sup>	5.3100	$t \leq 30$	220	350	22
		$30 < t \leq 60$	210	330	18
		$60 < t \leq 200$	200	320	15
EN-GJS-350-22-RT <sup>b</sup>	5.3101	$t \leq 30$	220	350	22
		$30 < t \leq 60$	220	330	18
		$60 < t \leq 200$	210	320	15
EN-GJS-350-22	5.3102	$t \leq 30$	220	350	22
		$30 < t \leq 60$	220	330	18
		$60 < t \leq 200$	210	320	15
EN-GJS-400-18-LT <sup>a</sup>	5.3103	$t \leq 30$	240	400	18
		$30 < t \leq 60$	230	380	15
		$60 < t \leq 200$	220	360	12
EN-GJS-400-18-RT <sup>b</sup>	5.3104	$t \leq 30$	250	400	18
		$30 < t \leq 60$	250	390	15
		$60 < t \leq 200$	240	370	12
EN-GJS-400-18	5.3105	$t \leq 30$	250	400	18
		$30 < t \leq 60$	250	390	15
		$60 < t \leq 200$	240	370	12
EN-GJS-400-15	5.3106	$t \leq 30$	250	400	15
		$30 < t \leq 60$	250	390	14
		$60 < t \leq 200$	240	370	11
EN-GJS-450-10	5.3107	$t \leq 30$	310	450	10
		$30 < t \leq 60$	bajo acuerdo entre el fabricante y el comprador		
		$60 < t \leq 200$			
EN-GJS-500-7	5.3200	$t \leq 30$	320	500	7
		$30 < t \leq 60$	300	450	7
		$60 < t \leq 200$	290	420	5
EN-GJS-600-3	5.3201	$t \leq 30$	370	600	3
		$30 < t \leq 60$	360	600	2
		$60 < t \leq 200$	340	550	1
EN-GJS-700-2	5.3300	$t \leq 30$	420	700	2
		$30 < t \leq 60$	400	700	2
		$60 < t \leq 200$	380	650	1
EN-GJS-800-2	5.3301	$t \leq 30$	480	800	2
		$30 < t \leq 60$	bajo acuerdo entre el fabricante y el comprador		
		$60 < t \leq 200$			
EN-GJS-900-2	5.3302	$t \leq 30$	600	900	2
		$30 < t \leq 60$	bajo acuerdo entre el fabricante y el comprador		
		$60 < t \leq 200$			

NOTA Es posible que las propiedades mecánicas de las probetas mecanizadas a partir de muestras de fundición no reflejen de forma exacta las propiedades de la pieza en sí. Los valores de las propiedades de tracción de la pieza se especifican en el anexo B con fines orientativos.

<sup>a</sup> LT significa baja temperatura (*Low Temperature*).

<sup>b</sup> RT significa temperatura ambiente (*Room Temperature*).

**Tabla B3.6.** Propiedades mecánicas de las fundiciones nodulares.

Designación del material		Espesor de pared determinante	Resistencia de ensayo 0,2%	Resistencia a la tracción	Alargamiento
Símbolo	Número	$t$ mm	$R_{p0,2}$ MPa min.	$R_m$ MPa min.	$A$ % min.
EN-GJS-450-18C	5.3108	$t \leq 30$	350	440	16
		$30 < t \leq 60$	340	420	12
		$60 < t \leq 200$	Valores orientativos proporcionados por el fabricante		
EN-GJS-500-14C	5.3109	$t \leq 30$	400	480	12
		$30 < t \leq 60$	390	460	10
		$60 < t \leq 200$	Valores orientativos proporcionados por el fabricante		
EN-GJS-600-10C	5.3110	$t \leq 30$	450	580	8
		$30 < t \leq 60$	430	560	6
		$60 < t \leq 200$	Valores orientativos proporcionados por el fabricante		

En caso de que el comprador requiera obtener valores mínimos de propiedades mecánicas en una ubicación determinada de la colada, estos valores tienen que acordarse con el fabricante.

**Tabla B3.7.** Propiedades mecánicas de las fundiciones nodulares.

Designación del material		Espesor de pared determinante $t$ mm	Valores mínimos de energía de impacto					
			J					
			Temperatura ambiente (23 ± 5) °C		Baja temperatura (- 20 ± 2) °C		Baja temperatura (- 40 ± 2) °C	
Simbólica	Númerica		Valor medio (3 ensayos)	Valor individual	Valor medio (3 ensayos)	Valor individual	Valor medio (3 ensayos)	Valor individual
EN-GJS-350-22-LT	5.3100	$t \leq 30$	—	—	—	—	12	9
		$30 < t \leq 60$	—	—	—	—	12	9
		$60 < t \leq 200$	—	—	—	—	10	7
EN-GJS-350-22-RT	5.3101	$t \leq 30$	17	14	—	—	—	—
		$30 < t \leq 60$	17	14	—	—	—	—
		$60 < t \leq 200$	15	12	—	—	—	—
EN-GJS-400-18-LT	5.3103	$t \leq 30$	—	—	12	9	—	—
		$30 < t \leq 60$	—	—	12	9	—	—
		$60 < t \leq 200$	—	—	10	7	—	—
EN-GJS-400-18-RT	5.3104	$t \leq 30$	14	11	—	—	—	—
		$30 < t \leq 60$	14	11	—	—	—	—
		$60 < t \leq 200$	12	9	—	—	—	—

NOTA Es posible que las propiedades mecánicas de las probetas mecanizadas a partir de muestras de fundición no reflejen de forma exacta las propiedades de la pieza en sí.

**Tabla B3.8.** Propiedades mecánicas de las fundiciones nodulares.

Designación del material		Intervalo de dureza Brinell HBW	
		Espesor de pared determinante $t$	
		$t \leq 60$ mm	$60 \text{ mm} < t \leq 200$ mm
EN-GJS-350-22	5.3102	menos de 160	menos de 160
EN-GJS-400-18	5.3105	130 a 175 <sup>a</sup>	130 a 175 <sup>a</sup>
EN-GJS-400-15	5.3106	135 a 180 <sup>a</sup>	135 a 180 <sup>a</sup>
EN-GJS-450-18	5.3108	170 a 200	160 a 190
EN-GJS-450-10	5.3107	160 a 210 <sup>a</sup>	160 a 210 <sup>a</sup>
EN-GJS-500-14	5.3109	185 a 215	170 a 200
EN-GJS-500-7	5.3200	170 a 230 <sup>a</sup>	150 a 230 <sup>a</sup>
EN-GJS-600-10	5.3110	200 a 230	190 a 220
EN-GJS-600-3	5.3201	190 a 270 <sup>a</sup>	180 a 270 <sup>a</sup>
EN-GJS-700-2	5.3300	225 a 305 <sup>a</sup>	210 a 305 <sup>a</sup>
EN-GJS-800-2	5.3301	245 a 335 <sup>a</sup>	240 a 335 <sup>a</sup>
EN-GJS-900-2	5.3302	270 a 360 <sup>a</sup>	270 a 360 <sup>a</sup>

NOTA 1 La dureza mínima se obtiene con una matriz ferrítica y bajo contenido en silicio. La dureza aumenta con la cantidad de perlita o incrementando el contenido de silicio.

NOTA 2 Los carburos eutécticos aumentan la dureza, pero normalmente no son deseables y es probable que sólo estén presentes en cantidades menores.

<sup>a</sup> Si el fabricante y el comprador así lo acuerdan, puede adoptarse un intervalo de dureza más reducido; normalmente, un intervalo de tolerancia de entre 30 y 40 unidades de dureza Brinell es aceptable. Este intervalo de dureza puede ser más amplio para los grados con una estructura de matriz ferrítica-perlítica.

**Tabla B3.9.** Propiedades mecánicas de las fundiciones nodulares.

## 4. Fundición de arena y clasificación de los defectos de fundición.

### 4.1. Fundición con moldeo de arena

Consiste en vaciar un metal fundido en un molde de arena, dejarlo solidificar y romper después el molde para extraer la fundición.

Elementos del moldeo con arena [Figura B4.1.]:

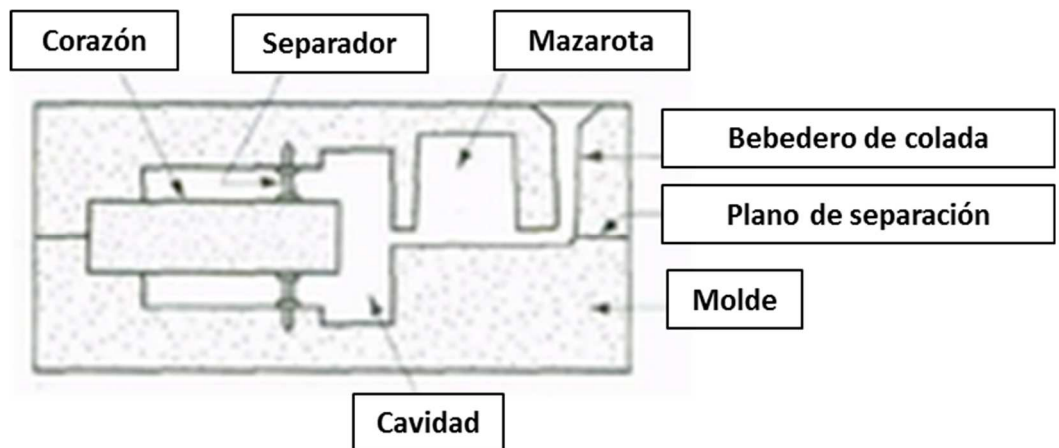


Figura B4.1. Elementos del molde con arena.

- Modelo:
  - Se fabrican de madera, fundición de hierro, aleaciones de aluminio, yeso, resinas epoxi.
  - Presenta dimensiones siempre mayores que las de las piezas, debido a: contracción de los metales al solidificarse y enfriarse y la necesidad acabado de presión por mecanizado posterior.
  - Debe preverse salidas adecuadas para extraer los modelos de los moldes.
- Machos o corazón: es un modelo de las superficies interiores, Se hace generalmente de arena compactada y puede requerir soportes para mantener su posición.
- Molde de arena: La arena de fundición es sílice ( $\text{SiO}_2$ ) + silicato de alúmina hidratada (arcilla). El sílice proporciona dureza y resistencia mecánica y la arcilla cohesión. La proporción típica, en volumen, es 90 % de arena, 3 % de agua y 7 % de arcilla.

Características:

- Buenas propiedades refractarias: capacidad de resistir altas temperaturas sin fundirse o degradarse.
- Resistencia: capacidad del molde para mantener su forma y soportar la erosión causada por el flujo del metal líquido.
- Permeabilidad: para permitir que el aire caliente y los gases de fundición pasen a través de los poros de arena. Depende del tamaño del grano, del contenido de arcilla y del porcentaje de humedad. Los granos grandes son más permeables pero los granos pequeños proporcionan mejor acabado superficial:

+ arcilla → + cohesión → - permeabilidad

+ humedad → dificulta paso de los gases

- Estabilidad térmica: capacidad de la arena en la superficie de la cavidad del molde para resistir el agrietamiento y encorvamiento en contacto con el metal fundido.
- Plasticidad: aptitud de la arena para reproducir la geometría del modelo.
- Retractabilidad: capacidad del molde para dejar que la fundición se contraiga sin agrietarse.
- Reutilización: estas medidas son algunas veces incompatibles, por ejemplo, un molde con una gran resistencia tiene menos capacidad de contracción.

Factores que afectan la operación de vaciado de metal fundido:

- Temperatura de vaciado: es la temperatura del metal fundido al momento de su introducción en el molde. Lo importante aquí es la diferencia entre la temperatura de vaciado y la temperatura a la que empieza la solidificación (el punto de fusión para un metal puro, o la temperatura líquida para una aleación).
- Velocidad del vaciado: velocidad volumétrica a la que se vierte el metal fundido. Velocidad muy lenta, el metal puede enfriarse antes de llenar la cavidad. Velocidad excesiva, genera turbulencia.
- Turbulencia: acelera la formación de los óxidos que pueden quedar atrapados durante la solidificación, degradando así la calidad de la fundición. Agrava la erosión del molde, desgastando las superficies.

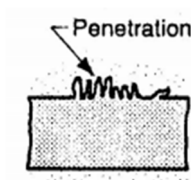
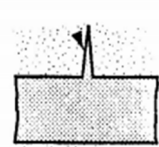
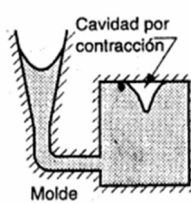
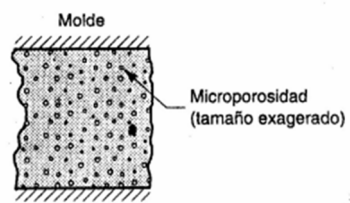
## 4.2. Defectos de la fundición de arena

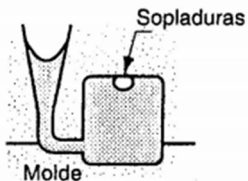
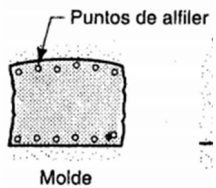
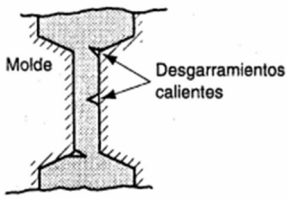
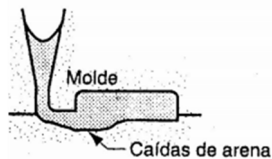
En el proceso de manufacturación se pueden presentar varios defectos, dependiendo de factores como los materiales, diseño de las piezas y técnicas de procesamiento. Aunque algunos defectos sólo afectan a la apariencia de las piezas, otros causan efectos adversos de importancia en la integridad estructural de las piezas fabricadas.

Dado la gran cantidad de defectos que se puede generar en las fundiciones, el *International Committee of Foundry Technical Associations* ha desarrollado una nomenclatura estándar que consiste en siete categorías básicas de defectos de fundición, identificados con letras mayúsculas en negritas:

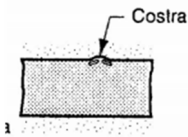
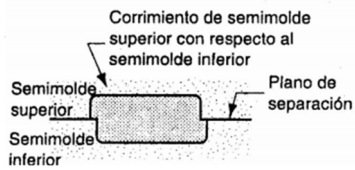
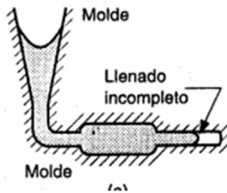
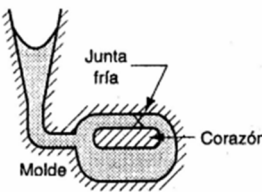

- A.** Proyecciones metálicas, formadas por aletas, rebabas o proyecciones masivas como ondulaciones y superficies ásperas.
- B.** Cavidades, formadas por cavidades redondeadas o ásperas internas o expuestas, incluyendo sopladuras, porosidad y cavidades de contracción.
- C.** Discontinuidades, como son grietas, grietas en caliente o en frío, y puntos fríos.
- D.** Superficie defectuosa, como son pliegues, traslapes, cicatrices, capas de arena adheridas y cascarilla de óxido.
- E.** Fundición incompleta, como son las faltas de llenado (debidas a una solidificación prematura), volumen insuficiente de metal vaciado y fugas (debido a pérdida del metal del molde después del vaciado).
- F.** Dimensiones o formas incorrectas, debido a factores como una inadecuada tolerancia de contracción, en error en el montaje del modelo, una contracción irregular, un modelo deformado o una fundición torcida por la liberación de esfuerzos residuales.
- G.** Inclusiones, que se forman durante la fusión, solidificación y moldeo. Por lo general, de naturaleza no metálica, se consideran como perjudiciales porque actúan como elevadores de esfuerzo y reducen la resistencia de la fundición. Se pueden filtrar partículas de hasta de 30  $\mu\text{m}$  durante el procesamiento del metal fundido. Durante la fusión se pueden formar inclusiones cuando el metal fundido reacciona con el entorno (por lo general oxígeno) o con material del crisol o del molde. Reacciones químicas entre componentes del metal fundido pueden producir inclusiones; escorias y otros materiales extraños atrapados en el metal fundido, también se convierten en inclusiones. El desmoronamiento de las superficies del molde y del corazón también produce inclusiones, lo que indica la importancia de la calidad de los moldes y de su mantenimiento.

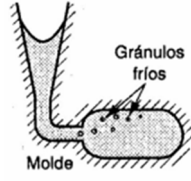
A continuación, se recopila una lista de defectos que ocurren en la fundición en arena. Estos defectos se ilustran y se describen brevemente en la **Tabla B4.1**.

A. PROYECCIONES METÁLICAS	
<p>Penetración. Cuando la fluidez del metal líquido es muy alta, éste puede penetrar en el molde o en el corazón de arena. Después de la solidificación, la superficie de la fundición presenta una mezcla de granos de arena y metal.</p> <p>Causas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fluidez excesiva del metal fundido (turbulencia)</li> <li>- Vaciado rápido</li> <li>- Alta temperatura de vaciado</li> <li>- Compactación insuficiente del molde</li> </ul>	 <p>Penetration</p>
<p>Molde agrietado (venas y relieves). Si la resistencia del molde es insuficiente, se puede desarrollar una grieta en la que el metal líquido puede entrar para formar una aleta en la fundición final.</p> <p>Causas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Compactación insuficiente del molde</li> </ul>	 <p>Grieta del molde</p>
B. CAVIDADES	
<p>Cavidad por contracción. Este defecto es una depresión de la superficie o un hueco interno en la fundición debido a la contracción por solidificación que restringe la cantidad de metal fundido disponible en la última región que solidifica. Ocurre frecuentemente cerca de la parte superior de la fundición, en cuyo caso se llama rechupe.</p> <p>Causas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Diferencia de temperatura entre el molde y el metal fundido</li> <li>- Mal diseño de la mazarota</li> </ul>	 <p>Cavidad por contracción</p> <p>Molde</p>
<p>Microporosidad. Se refiere a una red de pequeños huecos distribuida a través de la fundición debido a la contracción por solidificación del último metal fundido en la estructura dendrítica. El defecto se asocia generalmente con las aleaciones, debido a la forma prolongada, en que ocurre la solidificación en estos metales.</p> <p>Causas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Diferencia de temperatura entre el molde y el metal fundido</li> <li>- Vaciado rápido</li> <li>- Baja temperatura de vaciado</li> </ul>	 <p>Molde</p> <p>Microporosidad (tamaño exagerado)</p>

<p>Sopladuras. Este defecto es una cavidad de gas en forma de pelota causada por un escape de gases del molde durante el vaciado. Ocurre en la superficie de la parte superior de la fundición o cerca ella.</p> <p>Causas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fluidéz excesiva del metal fundido (turbulencia)</li> <li>- Vaciado rápido</li> <li>- Baja permeabilidad, pobre ventilación y alto contenido de humedad en la arena del molde</li> </ul>	
<p>Puntos de alfiler. Es un defecto similar al de las sopladuras que involucra la formación de numerosas cavidades pequeñas de gas en la superficie de la fundición o ligeramente por debajo de ella.</p> <p>Causas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fluidéz excesiva del metal fundido (turbulencia)</li> <li>- Vaciado rápido</li> </ul>	
<p><b>C. DISCONTINUIDADES</b></p>	
<p>Desgarramiento caliente. Este defecto, también llamado agrietamiento caliente, ocurre cuando un molde, que no cede durante las etapas finales de la solidificación o en las etapas primeras de enfriamiento, restringe la contracción de la fundición después de la solidificación. Este defecto se manifiesta como una separación del metal (de aquí el término desgarramiento o agrietamiento) en un punto donde existe una alta concentración de esfuerzos, causado por la indisponibilidad del metal para contraerse naturalmente. En la fundición en arena y otros procesos con molde desechable o consumible, esto se previene arreglando el molde para hacerlo retráctil. En los procesos de molde permanente se reduce el desgarramiento en caliente, al separar la fundición del molde inmediatamente después de la solidificación</p> <p>Causas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Molde incompatible/inadecuado: geometría y/o material</li> </ul>	
<p><b>D. SUPERFICIE DEFECTUOSA</b></p>	
<p>Caídas de arena. Este defecto provoca una irregularidad en la superficie de la fundición, que resulta de la erosión del molde de arena durante el vaciado. El contorno de la erosión se imprime en la superficie de la fundición final.</p> <p>Causas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mala compactación del molde</li> <li>- Fluidéz excesiva del metal fundido (turbulencia)</li> <li>- Vaciado rápido</li> </ul>	



<p>Costras. Son áreas rugosas en la superficie de la fundición debido a la incrustación de arena y metal. Son causadas por desprendimientos de la superficie del molde que se descascaran durante la solidificación y quedan adheridas a la superficie de la fundición.</p> <p>Causas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mala compactación del molde</li> </ul>	 <p>Costra</p>
<p>Corrimiento del molde. Se manifiesta como un escalón en el plano de separación del producto fundido, causado por el desplazamiento lateral del semimolde superior con respecto al inferior.</p> <p>Causas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mal diseño del molde</li> <li>- Desgaste de las fijaciones</li> <li>- Vaciado rápido</li> </ul>	 <p>Corrimiento de semimolde superior con respecto al semimolde inferior</p> <p>Semimolde superior</p> <p>Semimolde inferior</p> <p>Plano de separación</p>
<p><b>E. FUNDICIÓN INCOMPLETA</b></p>	
<p>Llenado incompleto. Este defecto aparece en una fundición que solidificó antes de completar el llenado de la cavidad del molde.</p> <p>Causas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja temperatura de vaciado</li> <li>- Vaciado que se realiza muy lentamente</li> <li>- Fluidez insuficiente del metal fundido</li> <li>- Diferencia de temperatura entre el molde y metal fundido</li> </ul>	 <p>Molde</p> <p>Llenado incompleto</p> <p>Molde</p>
<p>Junta fría. Una junta fría aparece cuando dos porciones del metal fluyen al mismo tiempo, pero hay una falta de fusión entre ellas debido a solidificación o enfriamiento prematuro. Sus causas son similares a las del llenado incompleto.</p> <p>Causas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja temperatura de vaciado</li> <li>- Vaciado que se realiza muy lentamente</li> <li>- Fluidez insuficiente del metal fundido</li> </ul>	 <p>Junta fría</p> <p>Corazón</p> <p>Molde</p>
<p><b>F. DIMENSIONES O FORMAS INCORRECTAS</b></p>	
<p>Corrimiento del corazón. Un movimiento similar puede suceder con el corazón, pero el desplazamiento es generalmente vertical. El corrimiento del corazón y del molde es causado por la flotación del metal fundido.</p> <p>Causas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vaciado rápido</li> <li>- Desgaste de las fijaciones</li> <li>- Mal diseño del molde</li> </ul>	 <p>El corazón se desplaza hacia arriba</p>

G. INCLUSIONES	
<p>Metal granoso o gránulos fríos. Las salpicaduras durante el vaciado hacen que se formen glóbulos de metal que quedan atrapados en la fundición. Un buen diseño del sistema y de los procedimientos de vaciado que eviten las salpicaduras puede prevenir este defecto.</p> <p>Causas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta temperatura de vaciado</li> <li>- Vaciado rápido</li> <li>- Fluidez excesiva del metal fundido (turbulencia)</li> </ul>	 <p>Gránulos fríos</p> <p>Molde</p>

**Tabla B4.1.** Defectos más comunes en la fundición en arena.

## 5. Probetas utilizadas durante los ensayos

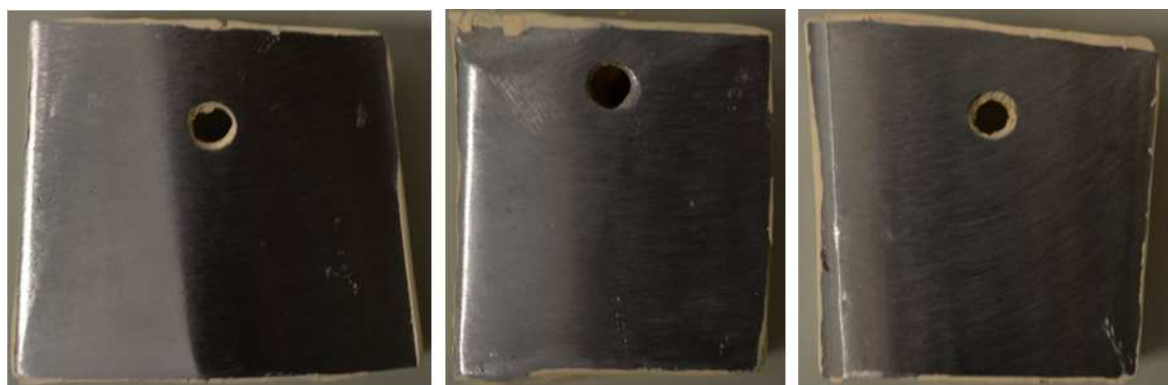
Las imágenes tomadas a las probetas antes de la realización de los ensayos son las que se presentan en la **Figura B5.1.**, **Figura B5.2.** y **Figura B5.3.** para la columna IV y en la **Figura B5.4.** y **Figura B5.5.** para la columna III.



**Figura B5.1.** Probetas A1, A2 y A3 de fundición de hierro.



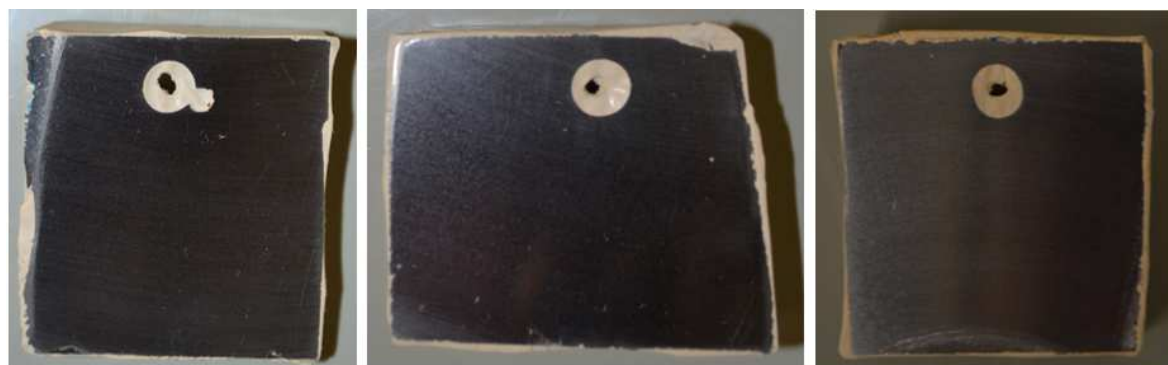
**Figura B5.2.** Probetas A4, A5 y A6 de fundición de hierro.



**Figura B5.3.** Probetas A7, A8 y A9 de fundición de hierro.



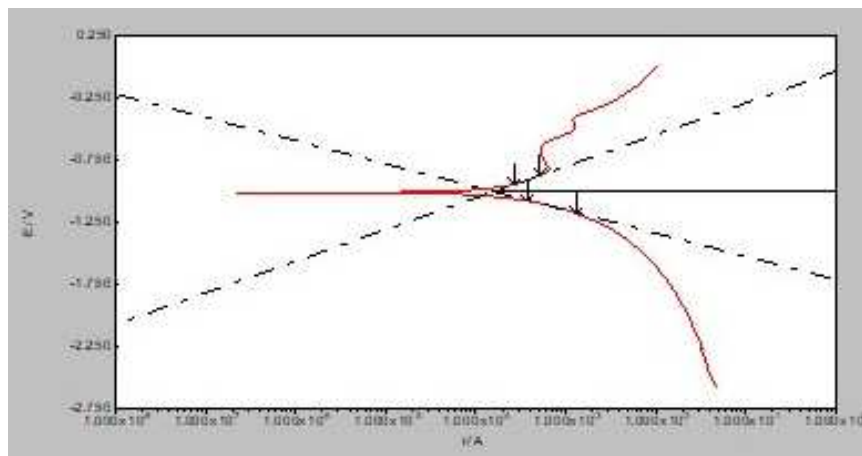
**Figura B5.4.** Probetas B1, B2 y B3 de fundición de hierro.



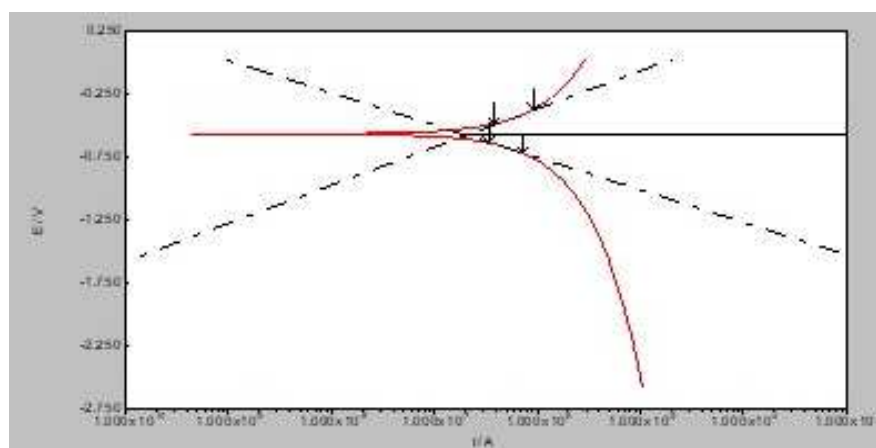
**Figura B5.5.** Probetas B4, B5 y B6 de fundición de hierro.

## 6. Resultados de los ensayos Tafel.

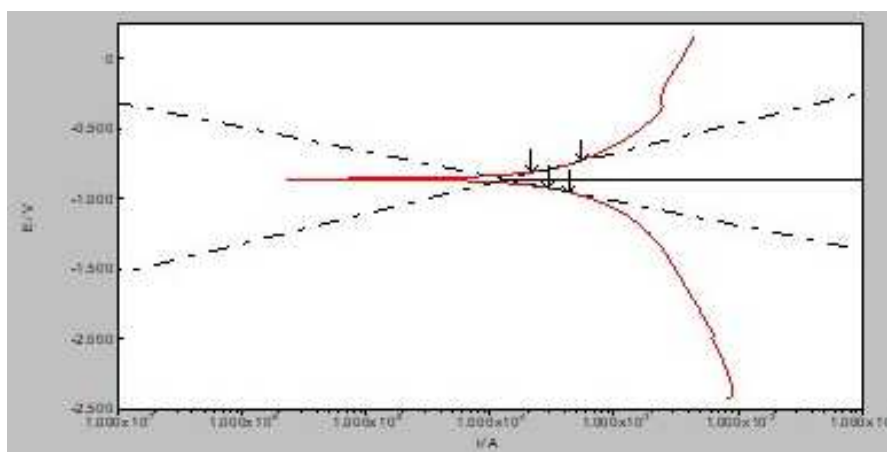
Las gráficas obtenidas de los ensayos Tafel son las que aparecen en la **Figura B6.1.**, **Figura B6.2.** y **Figura B6.3.**



**Figura B6.1.** Gráfica del ensayo Tafel de la probeta A7.



**Figura B6.2.** Gráfica del ensayo Tafel de la probeta A8.



**Figura B6.3.** Grafica del ensayo Tafel de la probeta A9.